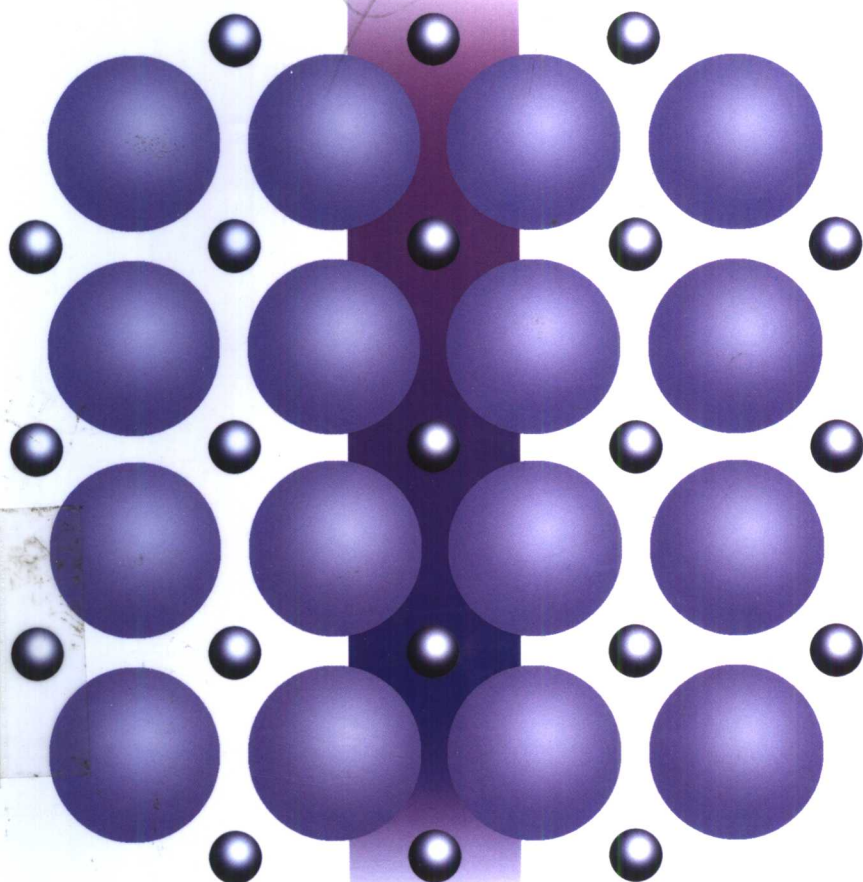


OHM 电子电气入门丛书

图
解

电机电器

〔日〕 饭高成男 泽间照一 著



科学出版社

OHM社

内 容 简 介

本套丛书系引进欧姆社版权翻译出版的中文版。基本涵盖了有关电子电气方面的全部知识。内容简洁,重点突出,同时配以大量插图帮助讲解,具有较高的参考阅读价值。

本书共分12章。第1章至第8章阐述各种交直流电机的原理、结构、特性及应用;第9章和第10章介绍变压器的工作原理、结构、连接法及应用知识;第11章和第12章为整流器、开关电器和保护电器方面的内容。

本书实用性强,可作为大、中专学生的参考书或教材,也适用于函授或自学,对于从事电机电器方面的技术人员及大、中专学校的教师有较高的参考价值。

作者简历

饭高成男

1965年 日本大学理工学部电气工学科
毕业

现在 东京都立墨田工业高等学校教导
主任

泽间照一

1965年 日本大学理工学部电气工学科
毕业

现在 东京都立羽田工业高等学校教导
主任

译、校者简历

李福寿

1956年 哈尔滨工业大学电机系毕业

现在 上海交通大学电力学院电气工程
系教授

任永捷

1970年 上海交通大学电机系毕业

现在 上海交通大学电力学院电气工程
系副教授, 电机实验室主任

TM3

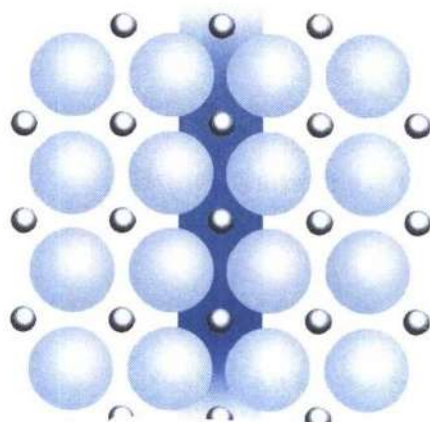
32

OHM 电子电气入门丛书

图解

电机电器

〔日〕 饭高成男 泽间照一 著
李福寿 译 任永德 校



北方工业大学图书馆



00489486

科学出版社 OHM 社

2001 北京

HD58/op

图字: 01 - 1999 - 3031 号

Original Japanese edition

Etoki Denki Kiki by Shigeo Iidaka and Teruichi Sawama

Copyright © 1986 by Shigeo Iidaka and Teruichi Sawama

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 1999

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

絵とき 電気機器

飯高成男 沢間照一 オーム社 1999 第1版第15刷

图书在版编目(CIP)数据

图解电机电器 / (日)饭高成男; (日)泽间照一著; 李福寿译.

— 北京: 科学出版社, 2000. 1

ISBN 7-03-008095-5

I. 图… II. ①饭… ②泽… ③李… III. ①电动机—图解

② 电器—图解 IV ① TM3-64 ② TM5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 69711 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2000 年 1 月第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

2001 年 3 月第二次印刷 印张: 5 7/8

印数: 5 001 ~ 8 000 字数: 148 000

定 价: 18.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换 <新欣>)

前 言

工业技术的发展已进入了机电一体化的时代,作为机电复合体的机器人(robot)和汽车是这一时代的代表。其中,关键部件是电动机、变压器、半导体整流器等小型电机电器。例如在高级汽车中,为了控制燃料和改善乘车感觉以及显示有关装置状态的需要,要使用40~50台电动机,一般家庭中也用到35台以上。

另一方面,随着产业的发展及家电产品的开发和普及,电力的需求正不断增加,由于发电机变压器的高效率化,正制造出数百万千瓦的大容量发电设备。再者,在日本,以新干线高性能大功率电力机车电动机的开发为代表,应用大功率电机电器的电力技术也正在发展。

在当前技术革新的时代,加强关于电机电器的种类及其原理和应用方法等等知识的学习是不可少的。

本书主要是为想学习各种电机电器的读者所写,书中重视基础知识的阐述,并以通俗易懂的方式解释原理、构造和操作方法等。书中还插入了大量照片和图,以帮助读者更好地理解书中内容。

本书按各种电机电器的动作状态分类:旋转电机,包括直流发电机、直流电动机、三相感应电动机、各种感应电动机、同步发电机、同步电动机、交流整流子电动机、小型电动机;静止的电器设备,包括变压器、各种其他变压器、整流器、开关设备和保护电器等共12章。并且,各章最后均附有习题,可自检理解的程度。

著者期望本书作为电机电器入门的学习参考书或教科书,能使读者增长有关电力技术方面的知识和能力。

最后说明,在编写本书之时,参考了先辈们的著作;另外,欧姆社(OHMSHA)各有关人士自始至终给予著者激励和指导,在此一并致谢!

著者

目 录

I 直流发电机

- 1.1 直流发电机的原理 12
电磁感应/感应电势的方向——弗莱明右手
定则/电势
- 1.2 直流发电机的构造 14
磁路(磁通的通路)/静止部分的绕组/旋转
部分(电枢)和电枢绕组/电枢与定子电气连
接的部分
- 1.3 直流发电机的性质 18
发电电压的大小/电枢反应
- 1.4 直流发电机的种类和特性 21
直流发电机的种类/各种特性曲线/主磁极
及磁滞/特性和用途
- 1.5 直流发电机的规格 25
发电机的输出功率和规格/发电机的效率/
温升/电压调整率

II 直流电动机

- 2.1 直流电动机的原理 30
电动机的反电势/电动机的转速
- 2.2 直流电动机的种类与特性 32
直流电动机的转矩/直流电动机的输出功率/
电动机的特性
- 2.3 直流电动机的速度控制和规格 36
直流电动机的起动/直流电动机的调速/制
动/反向旋转/直流电动机的规格

III 三相感应电动机

- 3.1 三相感应电动机的原理 42
将磁铁转动, 线圈也沿同方向转动/不用转动磁铁的方法使磁场旋转——旋转磁场/感应电动机的定子和转子
- 3.2 三相感应电动机的结构 44
三相感应电动机的定子/笼型转子——笼型感应电动机/绕线型转子——绕线型感应电动机
- 3.3 三相感应电动机的性质 48
转差率/感应电动机和变压器的相似性/感应电势和电流/运行中的二次电流
- 3.4 等效电路和圆图 52
简化等效电路/由简化等效电路可求出的值/圆图
- 3.5 三相感应电动机的特性 56
输入、输出和损耗的关系/转矩和同步功率/转速特性曲线/转矩的比例推移/最大转矩/输出功率特性曲线
- 3.6 起动和运行 61
起动方法/调速

IV 各种感应电动机

- 4.1 特殊笼型三相感应电动机 66
特殊笼型比普通笼型的起动性能好/双笼三相感应电动机/深槽式笼型三相感应电动机
- 4.2 单相感应电动机 68
旋转原理/各种单相感应电动机

V 同步发电机

- 5.1 同步发电机的原理 74
交流电压的产生/磁极数和同步转速

5.2 同步发电机的结构和种类	76
同步发电机的种类/水轮发电机/汽轮发电机/ 活塞式发动机作原动机的发电机/自励式同步 发电机/电枢绕组绕法/绕组系数和感应电势 幅值	
5.3 同步发电机的特性	80
电枢反应和漏电抗/同步电抗/等效电路和 向量图/特性曲线和短路比	
5.4 同步发电机的并联运行	84
为何要并联运行/并联运行的条件/并联运行 步骤	

VI 同步电动机

6.1 同步电动机的原理和结构	88
同步电动机的原理/同步电动机的结构	
6.2 同步电动机的性质和特性	90
同步电动机的向量图/输出功率和 $\sin\delta$ 成正 比/转矩亦与 $\sin\delta$ 成正比/转矩特性曲线/ 失步停转/励磁和相位的关系/V形曲线(相 位特性曲线)	
6.3 同步电动机的起动方法	94
同步电动机的起动方法/同步电动机的振荡	

VII 交流整流子电动机

7.1 单相串励整流子电动机	98
原理和直流串励电动机相同/结构/特性/用 途	
7.2 徐拉格型三相并联励磁电动机	100
原理和结构/电刷间隔和转速/特性/用途	

VIII 小型电动机

- 8.1 伺服电动机 104
伺服电动机/直流伺服电动机/交流伺服电动机/用途
- 8.2 微型电动机 106
微型电动机/微型电动机的种类/直流微型电动机/交流微型电动机
- 8.3 脉冲电动机(步进电动机) 108
脉冲电动机是由脉冲信号驱动的电动机/脉冲电动机的种类/脉冲电动机的驱动/用途
- 8.4 直流电动机的控制电路 110
直流电动机的转速容易随转矩改变/关于直流电动机的控制

IX 变压器

- 9.1 变压器的原理 114
变压器的作用/变压器的原理/根据匝数比变压
- 9.2 变压器的结构 118
按铁芯和绕组的配置分类/铁芯/绕组/外箱和套管
- 9.3 变压器的电压和电流 122
理想变压器的电压、电流和磁通/实际变压器有绕组电阻和漏磁通
- 9.4 等效电路 126
利用变压器等效电路计算简单/归算到一次侧的等效电路/考虑励磁电流的简易等效电路/归算到二次侧的等效电路
- 9.5 规格和损耗 130
使用变压器时要注意规格/铜耗、磁滞损耗和涡流损耗
- 9.6 效率和电压调整率 134

变压器的效率/电压调整率	
9.7 变压器温升和冷却	137
温升和温度测量/冷却方法/变压器油和油劣 化的防止	
9.8 极性和并联运行	141
极性和输出端符号/并联运行	
9.9 三相连接法	143
三台单相变压器的三相连接/ Δ - Δ 连接/ Δ - Y 连接/Y- Δ 连接/Y-Y 连接	
9.10 V 连接法	147
V-V 连接/为何两台单相变压器可得对称三 相电压	

X 各种变压器

10.1 三相变压器	152
结构/和三台单相变压器的比较	
10.2 自耦变压器和单相感应调压器	154
单绕组的自耦变压器/单绕组变压器另一类 型——单相感应调压器	
10.3 测量用互感器	156
测量高电压、大电流用的互感器/电压互感器 (potential transformer: PT)/电流互感器(current transformer: CT)	

XI 整流器

11.1 半导体整流器	160
半导体整流器/硅二极管/硒整流器	
11.2 电力用晶闸管	164
晶闸管/晶闸管的应用/SI 晶闸管	
11.3 整流电路	168
整流电路/单相全波桥式整流电路/三相半 波整流电路/三相桥式整流电路	

XII 开关电器和保护电器**12.1 开关电器 174**

关于开关电器/开闭器/隔离开关/断路器

12.2 保护电器 178

关于保护电器/保护继电器的分类/感应圆

盘型过流继电器/固态型过流继电器

练习题答案 183

I

直流发电机

日本最早用架空线路供电是以直流发电机发出的直流电进行供电的。距今约 100 年前的 1887 年，东京电灯公司（东京电力有限公司的前身）开始从东茅场街向邻近地区送电。当时 220V 的直流送电限制供电范围为 2km 以内。直流发电机发出的不能用变压器变压的电力，只能向附近的负载供电。实际利用直流发电机的场合为电解电镀等需要大的直流电的工厂。

1.1 直流发电机的原理

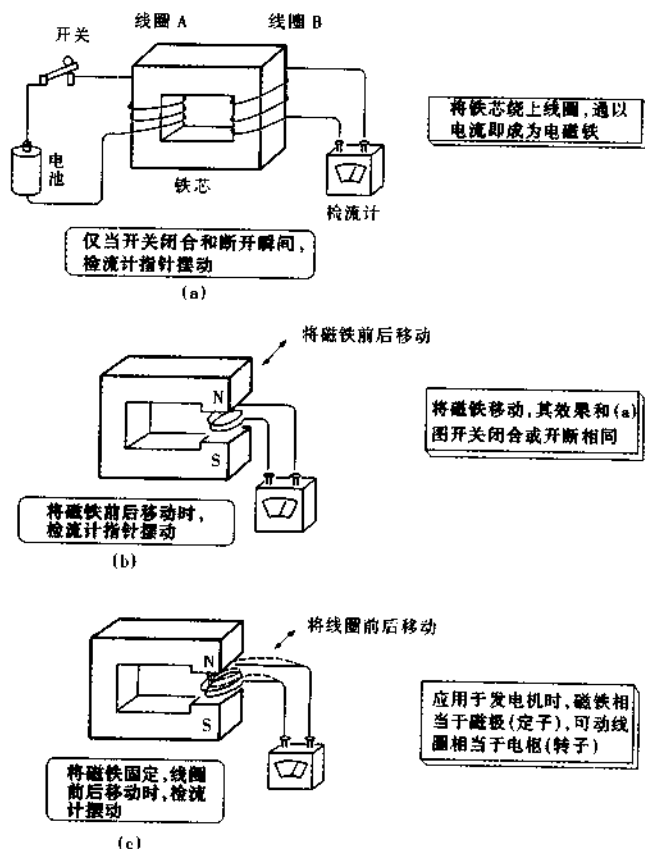


图 1.1 电磁感应

1.1.1 电磁感应

横穿导体的磁通发生变化时, 该导体将产生电势。这一现象称为电磁感应作用。这样产生的电压称为感应电势(参看图 1.1)。

1.1.2 感应电势的方向——弗莱明右手定则(参看图 1.2)

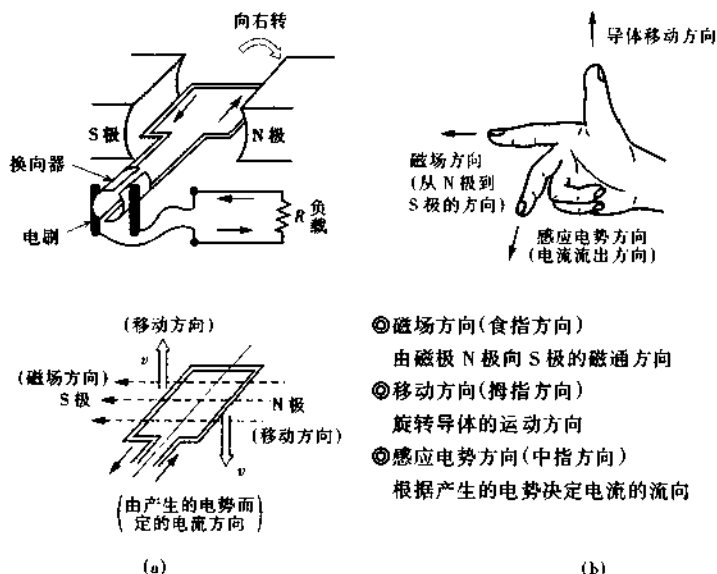


图 1.2 感应电势和右手定则

1.1.3 电 势

干电池是靠化学作用而产生电势的；而发电机是靠电磁感应作用产生电势的。电势是使电流流通的力，电压的单位是 [V (伏)]。

1.2 直流发电机的构造

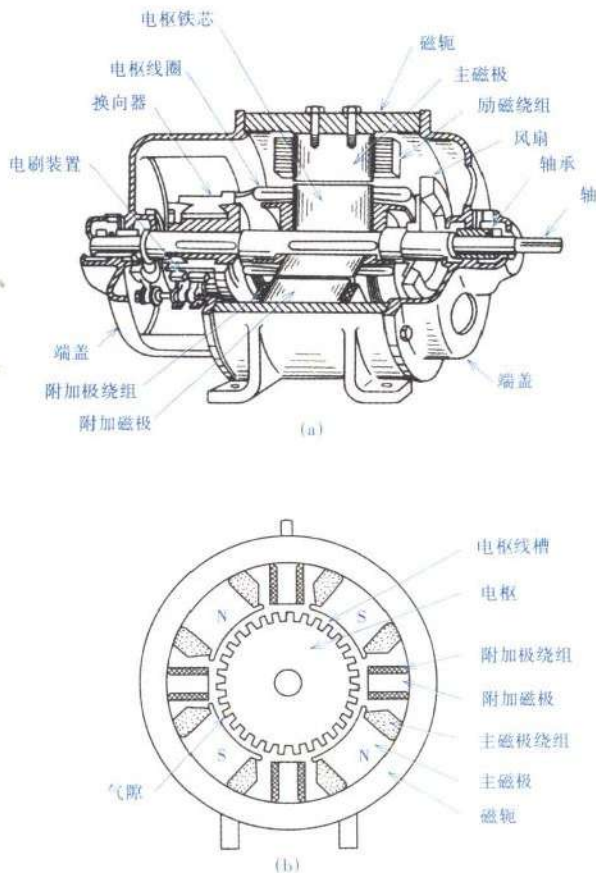


图 1.3 直流发电机的构造

静止部分有：

主磁极、励磁绕组、电刷、轴承、磁轭和电刷装置等。

旋转部分(称为电枢)有：

电枢铁芯、电枢绕组、换向器、轴等(参看图 1.3)。

1.2.1 磁路(磁通的通路)(参看图 1.4,图 1.5)

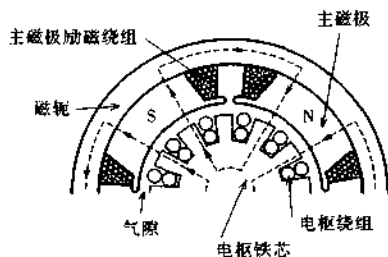


图 1.4 磁通的分布

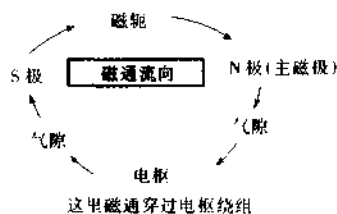


图 1.5 磁通的磁路

1.2.2 静止部分的绕组

(1) **串励绕组** 以产生磁通为目的,它绕在主磁极上,并与电枢绕组串联连接。

(2) **并励绕组** 以产生磁通为目的,它绕在主磁极上,并与电枢绕组并联连接。

(3) **附加磁极绕组** 以防止电枢反应为目的,它绕在附加磁极上,并与电枢绕组串联连接。

(4) **补偿绕组** 以防止电枢反应为目的,它绕在主磁极顶端(磁掌上),并与电枢绕组串联连接,只用于大型发电机。

1.2.3 旋转部分(电枢)和电枢绕组(参看图 1.6、图 1.7)

电枢 电枢是产生电压的重要部分,它以轴为中心安装上电枢铁芯、电枢绕组和换向器等部件。

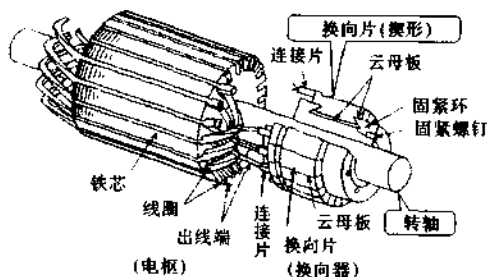


图 1.6 转子的构造

(1) **电枢铁芯** 使定子励磁后产生的磁通容易通过电枢,并使绕组线圈每边能切割磁通;铁芯表面部分设有槽,嵌放电枢绕组。

(2) 电枢绕组的绕制方法有**叠绕**和**波绕**两种。

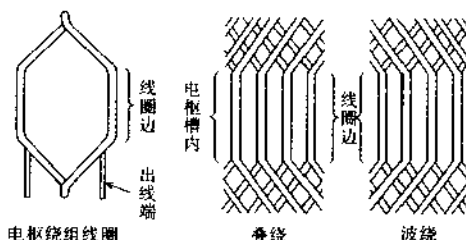


图 1.7 电枢绕组的绕制方法

叠绕就像屋顶瓦片那样将绕组线圈一个个叠起来。每个线圈出线端立即与相邻的线圈相连。从取出电势的电刷来看,并联支路数与极数相等,若为四极发电机,则有四个由电势而定的电流流通电路。极数越多,并联支路数也越多,因而叠绕适用于低电压大电流的发电机。

波绕是出线端要跨过两极位置与另一线圈连接起来。从正负两端看过去,与极数无关,并联支路数皆为 2。由此可以说,波绕为串联绕组,电刷两个即可,它适用于高电压发电机。

总槽数与绕组绕制方法的关系:总槽数被极数整除时可用叠绕,而当除不尽时可用波绕。

1.2.4 电枢与定子电气连接的部分

(1) 电流在电势作用下流出

(a) **换向器** 换向器的作用是将因电枢绕组线圈感应电势而产生的电流,经过换向片表面送给静止部分的电刷;因为根据感应电压而生的电流是交流性质的,故换向器的另一作用是将其电流整流为流向一定的直流。

(b) **电刷和刷握** 电刷和刷握的作用是:换向器流出的电

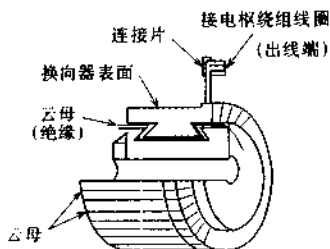


图 1.8 换向器的构造

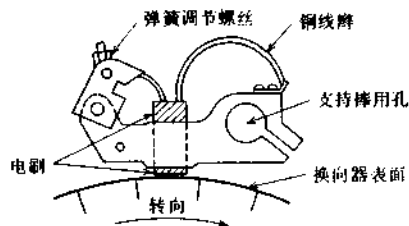


图 1.9 电刷装置(电刷和刷握)

流由电刷接收后送给输出端子，另外还可调整电刷和换向器表面的接触力。

电刷种类包括小型电机用的炭刷，大电流用的有金属石墨电刷，还广泛应用电化石墨电刷。

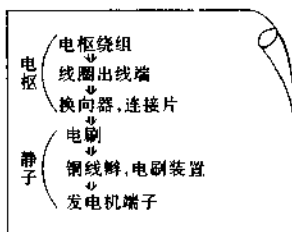


图 1.10 感应电势的产生

1.3 直流发电机的性质

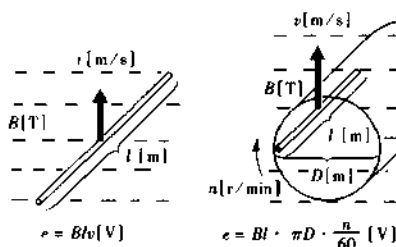


图 1.11 一根导体感应的电压

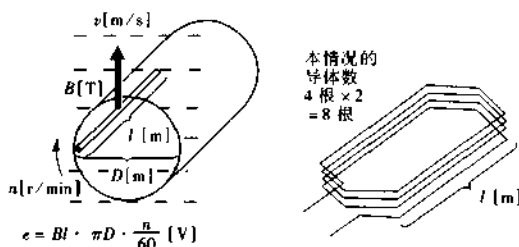


图 1.12 一个线圈的导体数

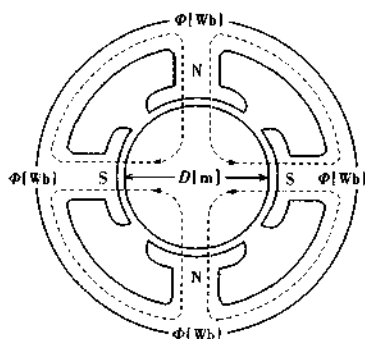


图 1.13 发电机的磁路

e [V]—一根导体的感应电势
 E [V]—电刷间表现的电势
 l [m]—绕组线圈边长
 D [m]—电枢直径
 B [T]—磁通密度(特斯拉) [Wb/m²]
 Φ [Wb]—磁通
 p [极]—磁极数
 n [r/min]—每分钟转速
 v [m/s]—速度(旋转的线速度)
 Z [根]—电枢总导体数
 a [路]—并联支路数
 叠绕 $a = p$
 波绕 $a = 2$

图 1.14 各符号的意义

1.3.1 发电电压的大小

磁场、导体和移动三者方向相互垂直作用时, 该导体的感应电势 $e = Blv$, 因旋转线速度 = (圆周) \times (每秒转速), 即

$$v = \pi D \frac{n}{60}$$

故

$$e = Bl \pi D \frac{n}{60}$$

(参看图 1.11、图 1.12。)

旋转中的电枢感应的电势可从正负两端子间串联连接的导体数和一根导体感应的电势 e 之积求出。

串联连接的导体数即为每一并联支路中导体总数，叠绕时并联支路与极数相同；波绕时与极数无关，等于 2。因此，

$$E = \frac{Z}{a} \times e$$

$$= \frac{Z}{a} B l \pi D \frac{n}{60}$$

式中 $B l \pi D$ 为全磁通（参看图 1.15），它等于各磁极的磁通和极数的乘积，即 $\Phi \times p$ ，故

$$E = \frac{Z}{a} \Phi p \frac{n}{60} = \frac{Z}{a} \times \frac{p}{60} \Phi n$$

因 Z, a, p 不变化，故产生的电压与磁通和转速之积成正比。

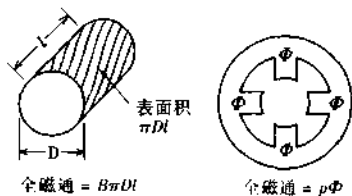
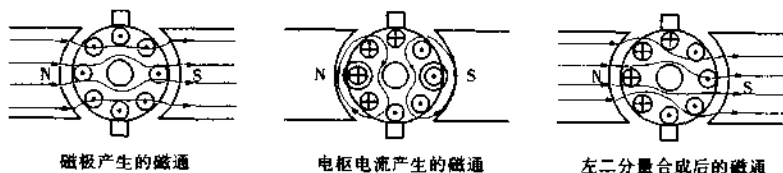


图 1.15 磁通

1.3.2 电枢反应

(1) 电枢反应 发电机接上负荷后，电枢中有电流流通，该



接通负荷的同时，电枢就有了电流，它使磁极产生的磁通发生畸变

图 1.16 电枢电流导致主磁极磁通畸变

电流就产生磁场。此磁场将使主极磁场的分布发生畸变。电刷位置处各换流片间将产生较大的电位差（参看图 1.16）。

(2) 电枢反应的影响 电刷使有电位差的换向片间短路，将产生火花，换向变坏，端电压下降（参看图 1.17）。

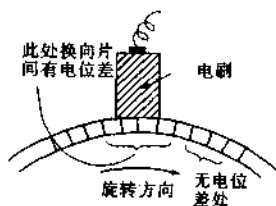


图 1.17 换向器和电刷

(3) **削弱电枢反应影响的办法** 不能移动电刷,而加装了附加磁极,以使畸变的磁通得到补偿。对于大型电机,在主磁极的顶端加装补偿绕组,也使磁通分布畸变得得到修正。

1.4 直流发电机的种类和特性

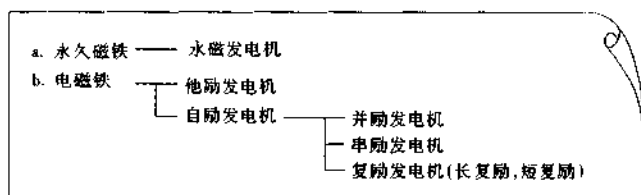


图 1.18 根据励磁方法分类

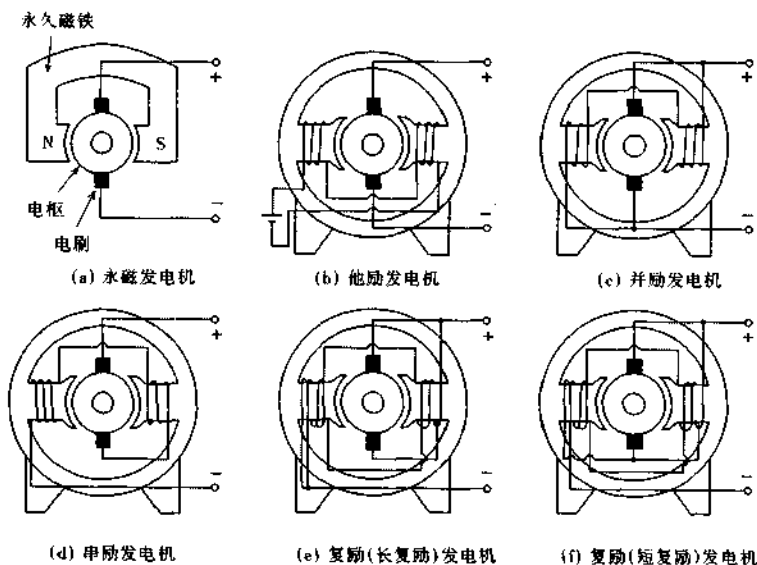


图 1.19 各种发电机

1.4.1 直流发电机的种类(参看图 1.18、图 1.19)

按励磁方法分类，直流发电机大体可分为两类：一类是利用永久磁铁形成磁场的永磁发电机；另一类则是他励或自励发电机，这一类都利用铁芯线圈通电流后形成电磁铁。永磁发电机为小型的，仅用于特殊场合。他励发电机需要另外的励磁用直流电

源。自动发电机是利用电机本身发电产生的电流进行励磁的,最初利用剩磁发电,随后发电电压逐步提高。

1.4.2 各种特性曲线

(1) **空载饱和曲线** 这表示在发电机空载及额定转速情况下,励磁电流和感应电势之间的关系曲线。

(2) **负载饱和曲线** 发电机以额定转速运行,在使负荷电流保持额定下,调节励磁电流,这时的励磁电流与端电压之间的关系曲线即为负载饱和曲线。

(3) **外特性曲线** 发电机以额定转速运行,使发电机供给负载额定电压和额定电流,保持这时的励磁电流和转速不变,求出的负载电流和端电压之间的关系曲线即为外特性曲线。

1.4.3 主磁极及磁滞

励磁绕组通电流时,使磁极磁化,铁芯磁化后将产生磁通。但由于**磁路饱和**,磁通不能超过一定值,如图 1.20 所示。另外,励磁电流增加和减少时,即使励磁电流相同,磁通密度也不同。参见图 1.21 所示的磁滞回线。

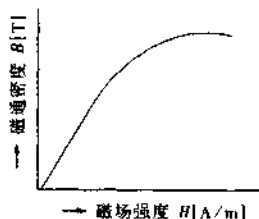


图 1.20 磁饱和曲线

1.4.4 特性和用途

(1) **他励发电机** 他励发电机需另外备有直流电源来进行励磁。这种发电机的特征是另需电源,端电压既能细调,又能输出高电压。另外,电压降很小,是恒压发电机。

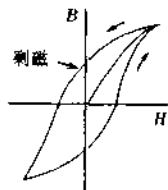


图 1.21 磁滞回线

[用途] 大型发电机用的励磁机、电化用的电源。

(2) **自动发电机** 自动发电机中又分并励、串励和复励三种。与他励发电机不同,它是靠本身发电产生的电流来励磁的。

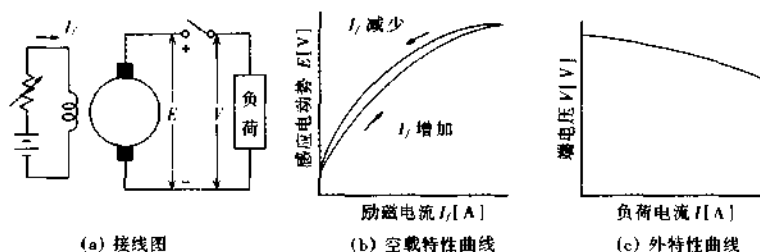


图 1.22 他励发电机的接线图和特性

(a) **并励发电机** 由与电枢并联连接的并励绕组励磁。经磁化过的主磁极因磁滞特性而留有剩磁。由此剩磁产生的电势，使励磁电流流通，只要励磁绕组的接法正确，从而产生更高的电势。图 1.23(b) 中的 OP 直线称为励磁电阻线，表示励磁电路的电阻大小。这种发电机的电压变化也小，故也可叫恒压发电机。

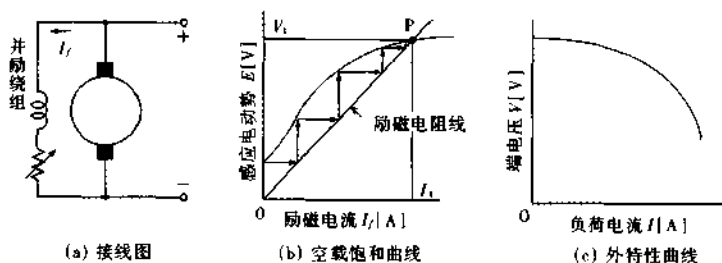


图 1.23 并励发电机的接线图和特性

[用途] 电池充电用、同步发电机励磁、电化学生电源以及作为他励电动机调速的控制电压。

(b) **串励发电机** 由与电枢串联的串联绕组励磁。因励磁电流等于负载电流，故空载时无励磁电流。把串联绕组中的电流看作为他励电流，就

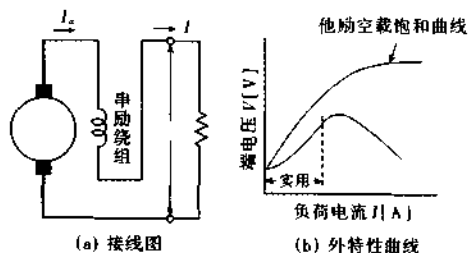


图 1.24 串励发电机的接线图和特性

可做出相应的空载饱和曲线。

这一空载饱和曲线和外特性曲线上端电压的差 = 由电枢绕组和串励绕组电阻引起的电压降 + 电刷电压降 + 电枢反应电压降。实用部分为外特性上端, 即电压上升的部分。这种发电机应用不多。

〔用途〕 升压机

(c) **复励发电机** 由并励绕组和串励绕组励磁 **短复励**和**长复励**是以并励绕组连接点不同而分类的, 发电机多用短复励。复励发电机的空载饱和特性和并励发电机相同。

积复励和差复励 这是以串励绕组和并励绕组的磁通为同方向还是反方向来定义的。积复励中又有**过复励**和**平复励**两种。过复励的特性表现为: 由串励绕组得到的励磁强, 且如串励发电机那样, 端电压随负荷电流增加而升高。平复励的特性表现为: 适当选择串励绕组的励磁, 可使空载端电压和额定负荷电流时的端电压相同。差复励时串励绕组和并励绕组产生的磁通方向相反, 负荷增加将引起电压下降。

〔用途〕 **过复励发电机** 用得不多, 通常用于需要补偿发电机与负荷间电压降的场合。

平复励发电机 同步发电机的励磁机、船舶电源。

差复励发电机 焊接用(恒流电源)。

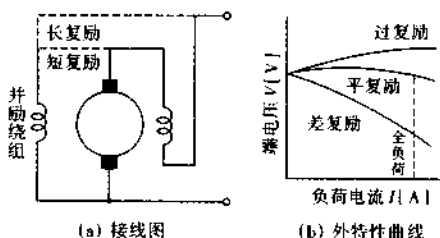


图 1.25 复励发电机的接线图和特性

1.5 直流发电机的规格

容 量	2kW	型 式	开 放
电 压	100V	励 磁	复 励
电 流	20A	规 格	连 续
转 速	1500(r/min)	重 量	
环境温度	40℃	号 码	17441
温 升	50℃	年 · 月	

图 1.26 标牌例

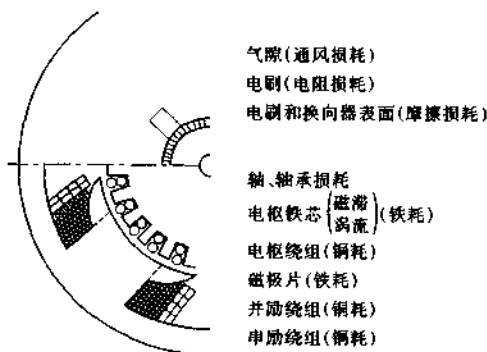


图 1.27 发生损耗的地方

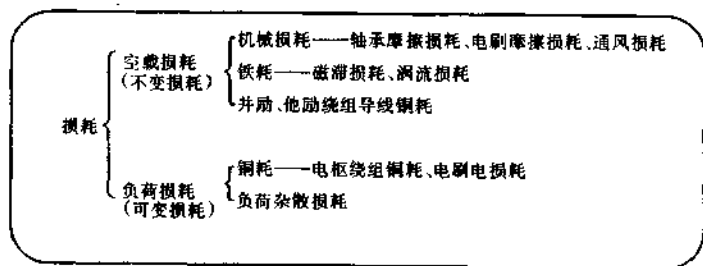


图 1.28 损耗的分类

1.5.1 发电机的输出功率和规格

发电机的额定输出功率为额定转速和额定电压时的功率[kW]。直流发电机的功率由端电压和负荷电流之积求得。额定功率为额定电压和额定电流的乘积。规格为连续的,表示可连续使用;而短时运行的规格,表示以在指定时间内使用作为使用条件。

超过额定电压、电流、功率和转速使用,将带来效率下降、损耗增加、温度异常上升以及换向变差等后果。

1.5.2 发电机的效率

效率以输出与输入之比表示,它常不一定能直接测得出来。直接测定的效率称为实测效率。而效率也可用间接法求得,此时发电机的输出功率由电压和电流的乘积求出,因输入功率不易实测,而令其为输出与损耗之和,即以测量和计算的方法求得效率*。

发电机效率约为75%~93%,功率越大的发电机效率越好,负荷电流越接近额定值时效率越好。

$$\begin{aligned}\text{效率}\eta &= \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{输出功率[kW]}}{\text{输出功率[kW]} + \text{损耗[kW]}} \times 100[\%]\end{aligned}$$

输出功率和损耗的关系如图1.29所示。

1.5.3 温升

发电机带负荷后,负荷电流引起绕组及铁芯发热。温度异常升高时,将使绝缘材料劣化,以致成为烧坏和短路的原因。标牌上标有温升上限。设计中考虑到在额定电压、电流、转速以及环境温度等范

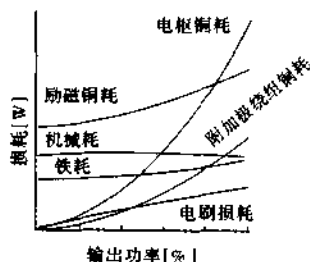


图 1.29 输出功率和损耗的关系

* 原文称为规约效率。——译者注

围内使用时,不会发生异常温升。

1.5.4 电压调整率

$$\text{电压调整率} = \frac{V_0 - V_N}{V_N} \times 100[\%]$$

式中, V_0 为空载时的端电压(参看图 1.30)。

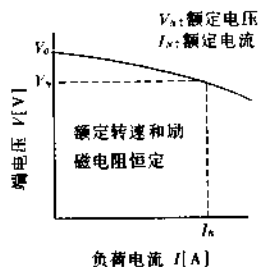


图 1.30 求电压调整率的方法

练习题

1. 图中直流发电机的磁极极性和感应电势的方向如图所示, 旋转方向是向右转还是向左转?

2. 电枢电阻 0.2Ω , 他励发电机空载时感应电势为 120V , 现将其接上 5.8Ω 负荷, 电枢反应和电刷电压降都不考虑。求下列各值:

(a) 电枢电流 (b) 发电机端电压 (c) 发电机输出功率

3. 磁极数为 4, 电枢绕组由 36 个线圈组成, 一个线圈 12 匝, 每个线圈边的感应电势为 0.6V 。求负荷电流为 50A 时, 叠绕和波绕的以下各值:

(a) 电枢并联支路数 (b) 电刷数 (c) 总导体数 (d) 串联导体数 (e) 并联支路电流 (f) 感应电势

4. 额定电压 200V 、额定输出功率 6kW 的并励发电机, 电枢绕组电阻 0.2Ω , 励磁回路的电阻为 40Ω , 求额定状态下的以下各值 (计算中不考虑电枢反应和电刷电压降)。

(a) 发电机额定电流 (b) 励磁电流 (c) 电枢电流 (d) 感应电势

5. 输出功率 12kW 的直流发电机的效率为 85% , 求输入功率及损耗。

6. 额定电压为 100V 、空载电压为 105V 的直流发电机的电压调整率为多少?

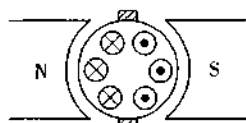


图 1

II

直流电动机

最早的直流电动机是在 1820 年由实验阶段发明出来的。作为直流电源,当时是只有电池的时代,因而功率很小。现在由于直流发电机和整流器的发展,用于电车、卷扬机、起重机和高速电梯等中的大功率电动机都制造出来了。直流电动机的结构原理与直流发电机相同。根据用途和功率的不同,形状上有些差别。这样,直流电机可以作为直流发电机用,反之也可作直流电动机用。因此,本章关于结构方面的内容将省略,请参看前一章。

2.1 直流电动机的原理

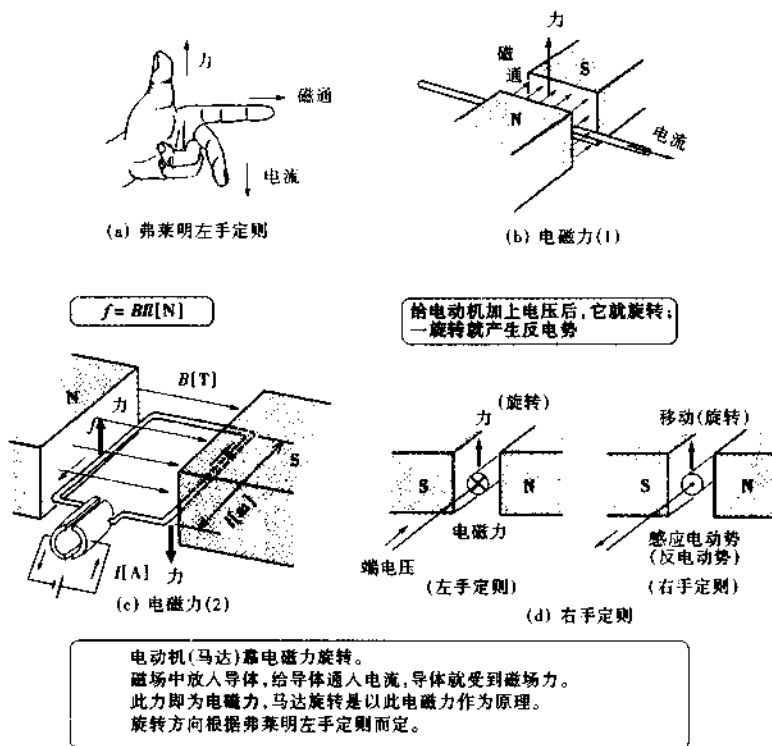


图 2.1 直流电动机的原理

2.1.1 电动机的反电势

电动机旋转时,电枢绕组就切割磁通,因而产生感应电势。此电势的方向与加在电动机端子电压的方向相反,故称反电势。电动机旋转产生的反电势较端电压小(图 2.2)。

令

$V[V]$: 端电压

$E[V]$: 反电势(感应电势)

I_a [A]: 电枢电流

r_a [Ω]: 电枢绕组电阻

Φ [Wb]: 每极磁通

n [r/min]: 转速

K, K' : 比例常数

则 $E = K\Phi n$ (感应电势的大小)

$V - E = r_a I_a$ (端电压和反电势之差等于绕组电阻的电压降)

$$V = E + I_a r_a$$

上式两边都乘以 I_a , 则

$$VI_a = EI_a + I_a^2 r_a$$

式中, VI_a 为电源供给电动机的功率, $I_a^2 r_a$ 为电枢绕组的铜耗。另外, $E I_a$ 意味着产生的动力, 扣除机械损耗后, 即成为电动机的输出功率。

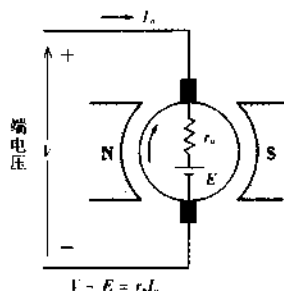


图 2.2 电动机的端电压和反电势

2.1.2 电动机的转速

$$V = E + r_a I_a$$

$$V = K\Phi n + r_a I_a$$

从而得

$$n = \frac{V - r_a I_a}{K\Phi} = \frac{E}{K\Phi} = K' \frac{E}{\Phi}$$

即电动机转速和反电势成正比, 而和磁通成反比。

2.2 直流电动机的种类与特性

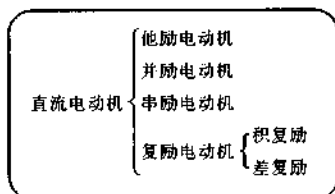
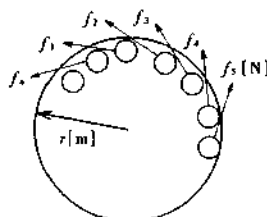
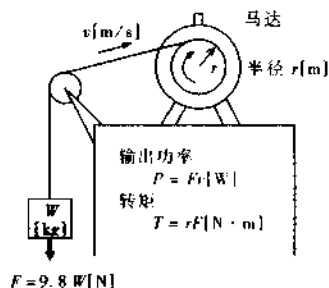


图 2.3 直流电动机的种类



$$T = r(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n)$$

图 2.4 电枢各导体产生的转矩



$$F = 9.8 \text{ W [N]}$$

图 2.5 电动机输出功率的原理图

2.2.1 直流电动机的转矩

$f = BIl$ [N] 作用于一根导体的电磁力大小

$B = \frac{p\Phi}{\pi D l}$ [T] 从磁极到电枢的平均磁通密度(图 2.6)

$I = \frac{I_a}{a}$ [A] 一根导体中的电流(图 2.7)

$F = f \times Z$ [N] 电枢总导体得到的电磁力

$T = F \times \frac{D}{2}$ [N·m] 电枢旋转产生的转矩

$$= \frac{p\Phi}{\pi D l} \times \frac{I_a}{a} \times l \times Z \times \frac{D}{2} = \frac{pZ}{2\pi a} \Phi I_a = K \Phi I_a \quad [K = \frac{pZ}{2\pi a}]$$

即转矩与磁极发出的磁通及电枢电流成比例。

$$\begin{aligned}\text{周边面积} &= 2\pi \times \frac{D}{2} \times l [nt] \\ \text{全磁通} &= p \times \Phi [Wb]\end{aligned}$$

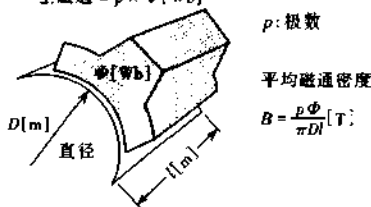


图 2.6 电动机的磁通密度

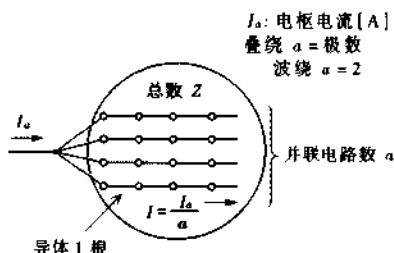


图 2.7 电枢绕组和导体

2.2.2 直流电动机的输出功率

$P = EI_a$ 电动机输出功率[W] E : 反电势 I_a : 电枢电流

$$E = \frac{Z}{a} \times \frac{p}{60} \times \Phi n \quad \text{反电势(感应电势, 发电机发出的电压)}$$

$$I_a = \frac{2\pi a}{pZ\Phi} T \quad \text{根据转矩公式}$$

$$P = EI_a = \frac{Zp\Phi n}{a \times 60} \times \frac{2\pi a T}{pZ\Phi} = \frac{2\pi n T}{60} = 2\pi \frac{n}{60} T = \omega T$$

电动机的输出功率可用角速度与转矩的乘积表示。

2.2.3 电动机的特性

直流电动机的特性包括转速特性和转矩特性。

(1) **转速特性** 这表示加在电动机端子上的电压不变时, 负荷电流和转速的关系。图中横轴为电流, 纵轴为转速。

(2) **转矩特性** 这表示加在电动机端子上的电压不变时, 负荷电流和转矩的关系。和速度特性一样, 横轴为负荷电流, 但纵轴为转矩。

下面图示各种电动机的速度特性和转矩特性, 并举例说明不同电动机的用途。

(a) **并励电动机** 电动机的速度以下式表示:

$$n = \frac{V - I_a R_a}{K\Phi}$$

因 R_a 很小,即使由于负荷原因 I_a 变大, n 值也不变化,即为恒速电动机。但由于断线等原因, I_f (流入并励绕组的励磁电流) 变为零时,因 Φ 趋于零, n 将过大,遂导致异常高速旋转。

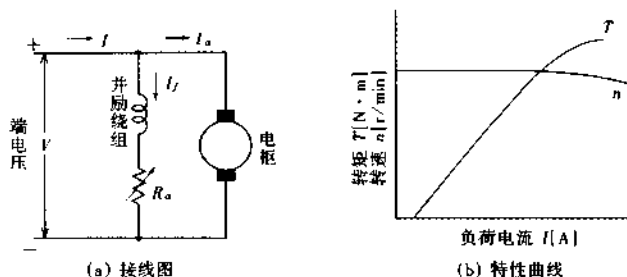


图 2.8 并励电动机的接线图和特性曲线

因转矩与电枢电流和磁通成比例,故若磁通不变,则转矩与负荷电流成比例。

〔用途〕 与三相感应电动机特性相似,除非有特殊情况,一般很少使用

(b) 串励电动机 因励磁绕组与电枢绕组串联,故 $I_a = I_f = I$ 。由于磁通和负荷电流成正比,故转速大体与电流成反比。这是变速度电动机,空载时将无约束速度,很危险。

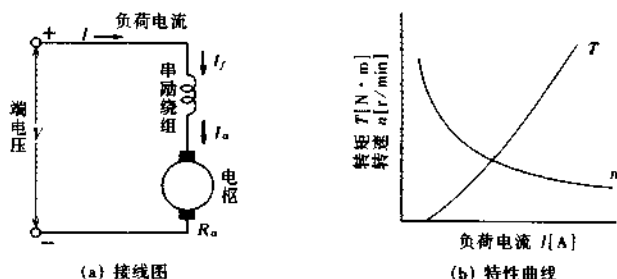


图 2.9 串励电动机的接线图和特性曲线

当 I 较小时,转矩与 I^2 成正比,较大时则与 I 成正比。

〔用途〕 电车、电机车、起重机、卷扬机

(c) 复励电动机 复励电动机一般用积复励。

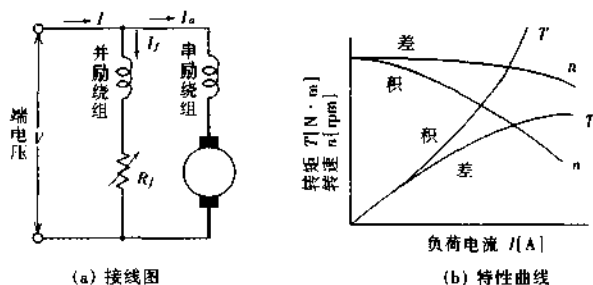


图 2.10 复励电动机的接线图和特性曲线

因为有并励绕组，故即使空载也不会有危险的转速。虽然差复励电动机的速度不变，但起动转矩小，运行时不易稳定，故几乎不用。

积复励电动机的起动转矩大，适用于负荷转矩不变的情况。

[用途] 电梯、起重机、工作机械

2.3 直流电动机的速度控制和规格

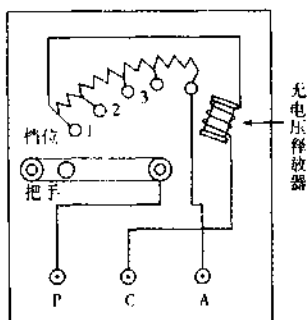


图 2.11 起动电阻器

	高电位	低电位
电 源	P(+)	N(-)
电 枢	A	B
并 励 绕 组	C	D
串 励 绕 组	E	F
附 加 极 绕 组	G	H
补 偿 绕 组	GC	HC
他 励 绕 组	J	K

图 2.12 直流机的端子符号

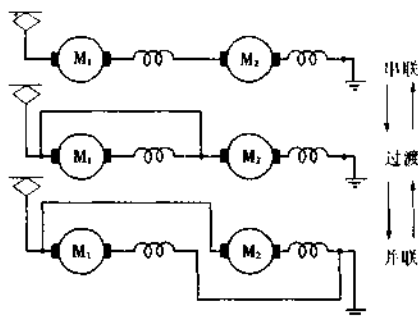


图 2.13 电车的串并联电压控制

2.3.1 直流电动机的起动

直流电动机的电枢电流 I_a ，根据 $V = E + I_a R_a$ ，有

$$I_a = \frac{V - E}{R_a}$$

因起动瞬间反电势 $E = 0[V]$ ，故 $I_a = V/R_a$ ，即电枢电流很大。为了把起动电流限制到额定电流值左右而使用的电阻称为起动器。

〔起动顺序〕

① 将励磁电阻值调到最小值 ($I_f \rightarrow$ 大)。

② 接上电源, 将操作把手旋到最初档位 (全起动电阻与电枢串联, 励磁电路中串入的无电压释放器成为电磁铁, 作好能够保持把手位置的准备, 使起动电流接近额定电流, 电动机旋转)。

③ 用把手推进电阻档位, 而无电压释放器保持把手新的位置 (电动机旋转起来后, 电流变小, 与电枢串联的起动电阻可以去除, 电枢直接接于电源, 而起动电阻串联接于励磁电路)。

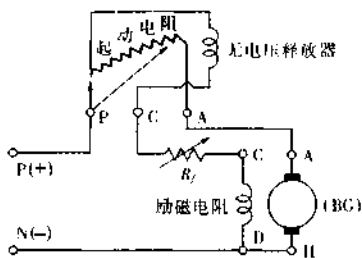


图 2.14 起动器的最初档位的电路

2.3.2 直流电动机的调速

直流电动机的转速 n 为

$$n = K \frac{V - I_a R_a}{\Phi} [\text{r/min}]$$

由上式知, 为了改变 n 值, 改变 Φ , I_a , V 中任意一值都可以, 故方法有:

① Φ , 用励磁电阻改变磁通的方法

② I_a , 用电枢电路的电阻改变电枢电流的方法

③ V , 把偶数台电动机或串联或并联, 使加于电动机的电压变化的方法

(1) 改变励磁的调速法 这是用于并励电动机、他励电动机

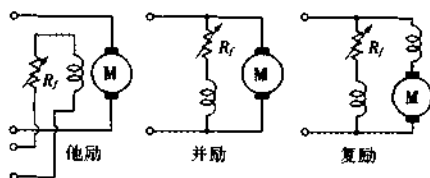


图 2.15 改变励磁的调速

机和复励电动机的方法。改变励磁电路电阻的大小,使磁通变化,从而进行调速。

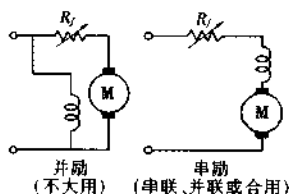


图 2.16 电枢电路接入电阻的调速

(2) 改变电枢电路的电阻 这是用于串励电动机的方法。在电枢电路中串入电阻,使电枢电流变化,从而进行调速。

(3) 改变电枢电压的调速法 主要用于串励电动机,偶数台电动机或串或并,使加于一台电动机的电压得到调整,从而进行调速。此法用于他励电动机时,电枢电压由他励发电机供给,该发电机由另一台电动机驱动。这时可进行广范围和细微的调速。用于卷扬机、压延机和高级电梯等地方。驱动用三相感应电动机和他励发电机之间装有飞轮,使负荷变化少,可进行广范围和精密的调速。

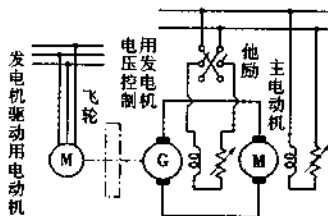


图 2.17 改变电枢电压的调速

2.3.3 制 动

制动方法分机械制动和电制动,电制动方法中又有两种:

(1) 发电制动 将运转中的电动机电源切除,接上制动电阻,电动机作为发电机工作,制动电阻作为负荷,产生焦耳热,这样起到制动作用。在电动机高速运转的场合,这种方式有制动效果。

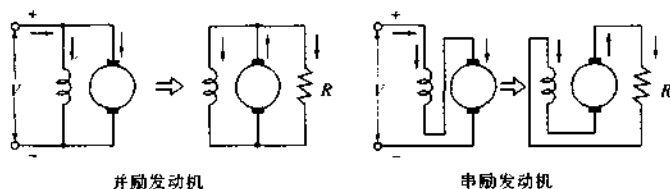


图 2.18 电制动

(2) **再生制动** 把电动机变为发电机这一点和发电制动相同,但本方法是将产生的电势返还给电源而得到制动。为此,必须使感应电势比加于电动机的电压还高。因此必须采取增加励磁电流等办法。电力车下坡有时用此法。

2.3.4 反向旋转

为使电动机反向旋转,原理上电枢端子或励磁电路反接都可以。一般是以改变电枢电流方向来使电动机反转。

2.3.5 直流电动机的规格

(1) **直流电动机的额定输出功率** 电动机的额定输出功率是指在额定转速和额定电压下的机械输出功率,其值以(W)或(kW)表示,这与发电机相同。

(2) 效率

$$\eta = \frac{\text{输入功率} - \text{损耗}}{\text{输入功率}} \times 100[\%]$$

输入功率为端电压乘以电流,损耗和发电机情况相同。

(3) 转速变化率

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100[\%]$$

式中 n_N : 额定转速, n_0 : 空载转速(保持额定转速时的励磁不变)

先在额定电压和额定负荷下调好额定转速,再去掉负荷;一旦电动机空载,其转速就上升,这时的转速即 n_0 。

练 习 题

1. 4 极、叠绕、电枢总导体数为 720 的直流电动机,转速为 1200r/min 、各极磁通为 0.01Wb ,求电动机反电势。

2. 直流电动机端电压为 220V ,电枢电流为 50A ,问旋转时反电势为多大?计算中电枢电阻取为 0.05Ω 。

3. 输出功率 15kW 的直流电动机转速为 1500r/min ,求角速度和转矩。

4. 有一台直流并励电动机,端电压为 215V ,电枢电流为 50A ,电枢电阻为 0.1Ω ,转速为 1500r/min ,求产生的转矩为多大。

5. 有一台直流串励电动机,电源电压为 525V ,电枢电流为 50A 时,转速为 1500r/min ,现若将电源电压减至 400V ,电枢电流相同时转速为多大?计算中电枢绕组及励磁绕组的全电阻为 0.5Ω 。

6. 有一台额定电压 100V 、 10kW 、电枢绕组电阻为 0.2Ω 的直流电动机。

(a) 在额定电压下起动时,起动电流为几安?

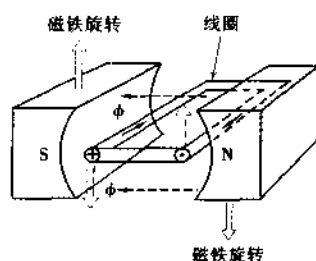
(b) 欲将起动电流限制在 50A 时,起动电阻为多大?

III

三相感应电动机

感应电动机是最常用的电动机，单相的用于家用电器，三相感应电动机用于工厂和其他地方。用途广的原因和优点可列举如下：第一是电源容易得到，家庭用的单相 100V(100V 是日本民用单相电压等级。——译者注)是由三相交流变压而来，工厂或其他用电大户是用三相供电；第二是结构简单，牢固耐用；第三是操作方便，容易运行；第四是价格便宜；第五是有稳定转速的特性，负荷变化时速度变化不大等等。

3.1 三相感应电动机的原理



因电磁感应线圈产生感应电动势,沿线圈有电流流通,这可应用右手定则。磁铁向右转相对地说等于线圈向左转。

图 3.1 原理图

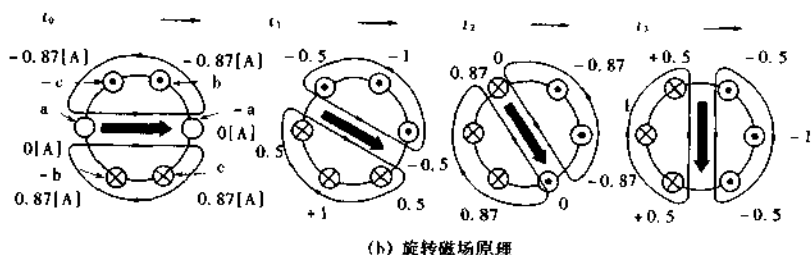
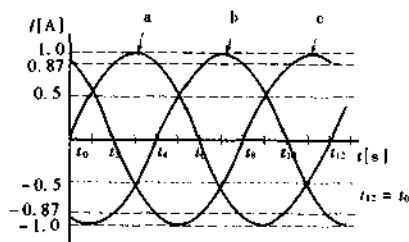


图 3.2 产生旋转磁场的方法(2极)

3.1.1 将磁铁转动,线圈也沿同方向转动

图 3.3 中磁铁向右转,我们认为这和内侧的线圈相对向左转是一样的。现用右手定则。移动方向:向下;磁通方向:从右至左;

电势方向:从前(书面)到后。电流将沿线圈形成环流。这一环电流和磁铁作用产生的电磁力为:当电流由前到里,磁通从左到右,力的方向应向上。就是说,线圈跟着磁铁转动的方向而转动。

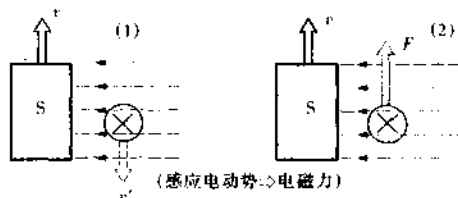


图 3.3 线圈跟着磁铁转动的方向而转动

3.1.2 不用转动磁铁的方法使磁场旋转——旋转磁场

感应电动机的工作原理是不用转动磁铁而使磁场旋转,这和使磁铁转动的作用是一样的。图 3.2 示的原理图是以两极为例的情况。该图表示对应 $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots$ 时刻,磁场旋转的情况。 t_0 时磁场指向右, t_3 时指向下, t_6 时指向左, t_9 时指向上, t_{12} 时又回到 t_0 时的位置,即转了一圈。两极时一周期转一回。

3.1.3 感应电动机的定子和转子

感应电动机中能够有旋转磁场是靠将定子绕组接上三相交流电源而实现的。定子绕组的旋转磁场使转子导体(线圈)因电磁感应而产生电势,沿线圈有环电流流通。转子感应出的电流和旋转磁场之间的电磁力作用使转子旋转。

3.2 三相感应电动机的结构

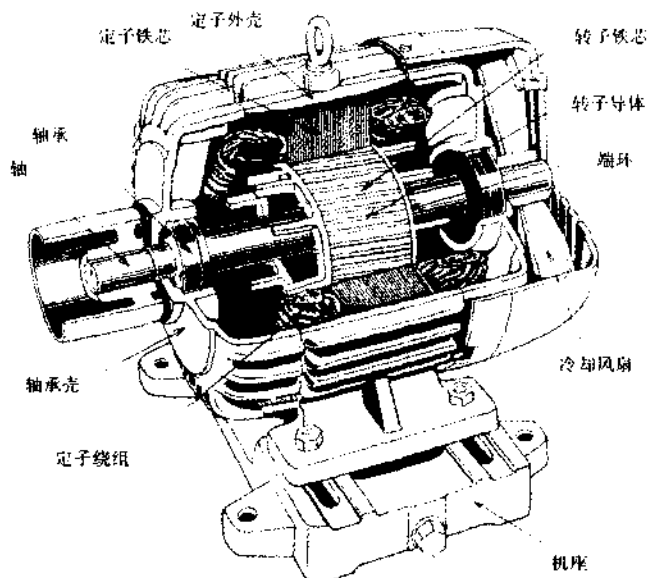


图 3.4 三相感应电动机的结构

- a) 定子(一次侧)
定子外壳、轴承、定子铁芯、定子绕组
- b) 转子(二次侧)
铁芯、转子
- i 笼型转子: 端环(短路环)、斜槽
- ii 绕线型转子: 滑环和电刷、轴、风道

图 3.5 定子和转子的构成

3.2.1 三相感应电动机的定子

作为感应电动机的定子是用来产生旋转磁场的, 它由定子铁芯、定子绕组、铁芯外侧的定子外壳、支持转子轴的轴承等组成。

铁芯用厚 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 的硅钢片叠成。在铁芯内圆有用以嵌

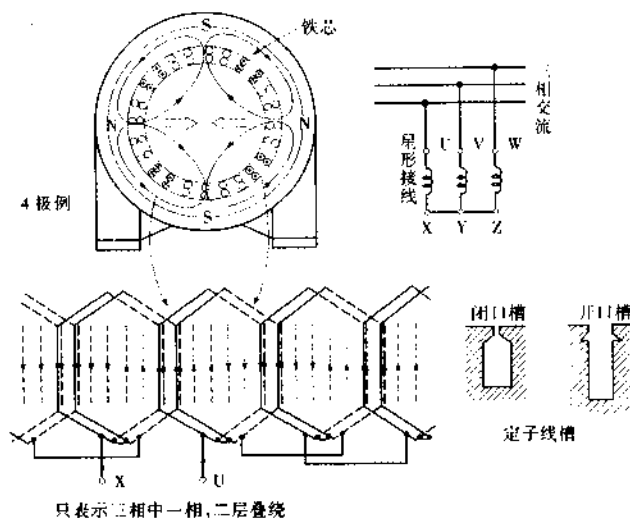


图 3.6 定子绕组(一次绕组)

放定子绕组的槽。四极时为 24 或 36 槽, 一个槽一般嵌入两层线圈。

绕组型式使用直流机也用的叠绕型式。绕组各相的接线采用每相电压负担小的星形连接法。极数越多, 旋转磁场的转速越慢。旋转磁场的转速为

$$n_s = \frac{120f}{p} [\text{r/min}]$$

式中 f : 频率[Hz], p : 极数。 n_s 称为同步转速。

3.2.2 笼型转子——笼型感应电动机

笼型转子(绕线型转子和直流机的电枢一样, 在铁芯上装有线圈)如果去掉铁芯, 只看电流流通的部分[导(铜)条和端环], 则它的外形就像一个笼子(鸟笼), 由此而得名。

(1) 转子铁芯 冲裁定子铁芯硅钢片剩下的部分, 可利用制作转子铁芯, 转子铁芯由冲槽的硅钢片叠成。

(2) 转子导条(没有绕组, 恰似笼型导条) 先在铁芯槽内

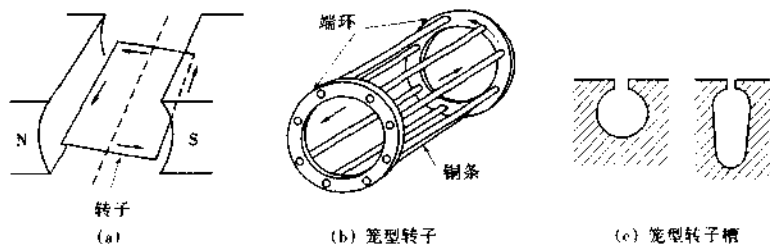


图 3.7 笼型转子

嵌入铜条，在其两端接上称为端环的环状铜板。由感应电势而生的电流在铜条和端环间循环，这一电流和旋转磁场作用而产生的电磁力使转子旋转起来。

(3) **斜槽转子** 笼型感应电动机的缺点之一是起动转矩小，扭斜一个槽位就可容易起动。

(4) **铸铝转子** 小功率感应电动机的铜导条和端环改用铝浇铸，形成铝导条和端环。

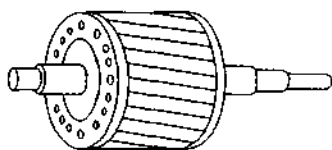


图 3.8 斜槽转子

这里，因为铝比铜电导率小，故需做大一点。这种铸铝转子正大量生产，连冷却风扇也能同时铸造出来。

3.2.3 绕线型转子——绕线型感应电动机

(1) **绕线型转子** 这与由导条和端环做成的笼型转子不同，如直流机一样，在铁芯上嵌有线圈。

(2) **转子铁芯** 由硅钢片叠成，铁芯圆周上冲有半闭口槽。三相绕组的排放要做到使转子极数与定子极数相同，其槽数也应选定。

(3) **转子绕组** 小容量电动机的转子绕组与定子绕组相同，可以采用双层叠绕方法；大容量时电流大，导线常采用棒状、方形等等的铜线。槽内先嵌入铜线，然后把它们连接起来，绕线方法一般采用双层波绕。

(4) **滑环** 绕线型和笼型的差别之一是：笼型的导条在转

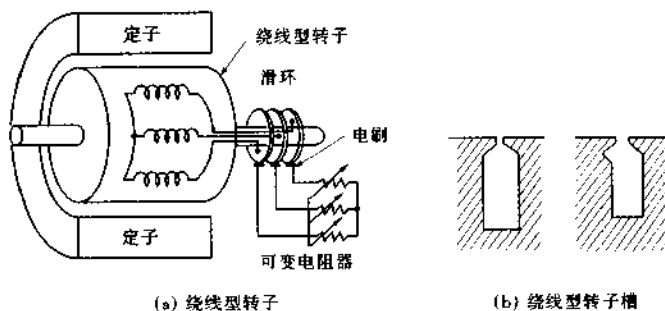


图 3.9 绕线型转子

子内构成闭合回路，与此相反，绕线型绕组中各相的一端在电气上与静止部分的可变电阻器连接，并形成闭合电路。旋转部分与静止部分在电气上连通是靠转子上的滑环(集电环)和电刷。

3.3 三相感应电动机的性质

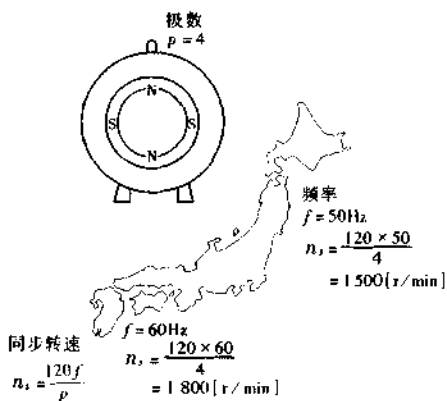


图 3.10 三相感应电动机的同步转速



图 3.11 同步转速和转差率

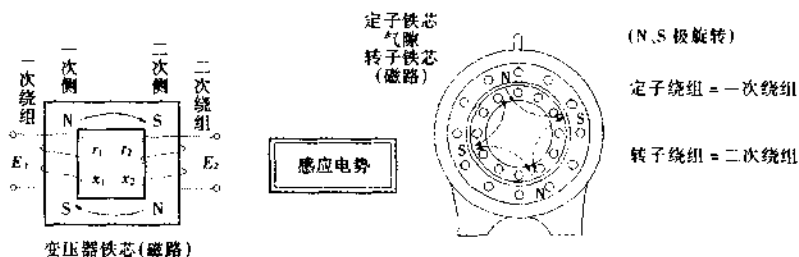


图 3.12 感应电动机与变压器的相似性

3.3.1 转差率

感应电动机是由于旋转磁场切割转子绕组而旋转的, 正因如此, 转子转速总是略低于同步转速。旋转磁场的转速 (同步转速) n_s 和转子转速 n 之差为转差, 转差和同步转速之比称为转差率。

转差率 $s = \frac{n_s - n}{n_s}$, 由此得转子转速为 $n = (1 - s)n_s$

电动机空载时 $s \rightarrow 0$, 起动前停止状态时 $s = 1$ 。小型机的转差率约为 5% ~ 10%, 大型机约为 3% ~ 5%。

3.3.2 感应电动机和变压器的相似性

变压器：在变压器一次侧施加交流电压后就会：①在一次绕组中有励磁电流；②在铁芯中产生交变磁通；③在二次绕组感应电势；④二次侧若有负荷，则二次绕组中有电流；⑤由于电磁感应的作用，一次绕组中的电流为励磁电流加负荷电流。

感应电动机：输入端加上三相交流电源后就会：①在定子绕组中有励磁电流；②旋转磁势使铁芯中产生磁通；③转子绕组感应电势；④在闭合的转子绕组中有感应电流流通，转子转动，加上机械负荷时转子电流增加；⑤由于电磁感应作用，定子电流也增加。

由以上比较可以看出，感应电动机和变压器有相似的性质。把感应电动机的定子绕组称为一次绕组，转子绕组称为二次绕组。如变压器一样，对感应电动机也可画出一个等效电路。

例题 4极，50Hz的三相感应电动机的转速为1425r/min，每分钟1425转，求此电动机的转差率是多少？

$$\text{解： } n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \quad [\text{r/min}]$$

$$s = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05 = 5\%$$

3.3.3 感应电势和电流

(1) 感应电势 给定子（一次）绕组每相施加电源电压 V_1 ，则励磁电流 I_0 随之流通，旋转磁场使定子（一次）绕组及转子绕组（二次）各相产生一次感应电势 E_1 及二次感应电势 E_2 。

(2) 漏电抗 励磁电流产生的磁通大部分成为主磁通，一部分成为漏磁通。只和二次绕组交链的磁通，才在二次绕组感应电势，并作为二次绕组的电压降起作用。二次绕组的情况是这样，一次绕组的情况也如此。

(3) 即将起动之前（停止）的二次电流 $n = 0, \rightarrow s = 1$

$$\text{即将起动之前的二次电流为 } I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}$$

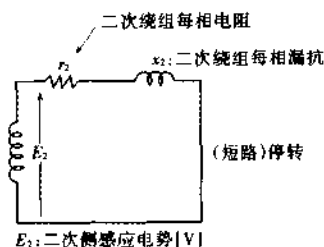


图 3.13 感应电动机二次侧的
等效电路(转子)

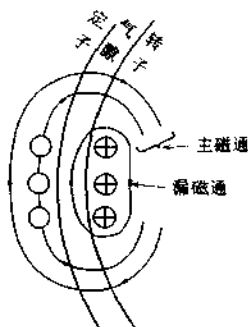


图 3.14 漏电抗

$$\text{二次功率因数为 } \cos \theta_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}$$

式中, r_2 为二次绕组每相电阻值, 因二次绕组为铜条或方铜线, 故电阻值很小。由上二式可知, 起动时二次电流值很大, 功率因数很差。

3.3.4 运行中的二次电流

电动机以转差率 s 旋转时,

(1) 二次感应电势和频率 因转差为 $n_s - n = sn_s$, 故旋转磁场的磁通切割二次绕组的量是即将起动前($s=1$)时的 s 倍。

$$\text{二次感应电势 } E_{2s} = sE_2 \quad [\text{V}]$$

$$\text{二次感应电势的频率 } f_2 = sf_1 \quad [\text{Hz}]$$

式中 f_1 为一次侧供给电源的频率。

(2) 二次绕组的漏电抗和阻抗 因电抗 $x = 2\pi fL$, 故 f 若变为 sf , 则 x 也变为 sx 。

$$\text{二次绕组每相漏电抗 } x_{2s} = sx_2 \quad [\Omega]$$

$$\text{二次绕组每相阻抗 } Z_{2s} = \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2} \quad [\Omega]$$

(3) 二次电流和二次功率因数 由上式可求出电流和功率因数, 即

$$\text{二次电流 } I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad [\text{A}]$$

$$\text{二次功率因数 } \cos\theta_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

(4) 等效电路

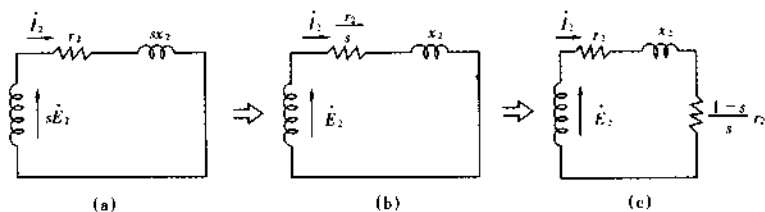


图 3.15 等效电路(二次侧)

3.4 等效电路和圆图

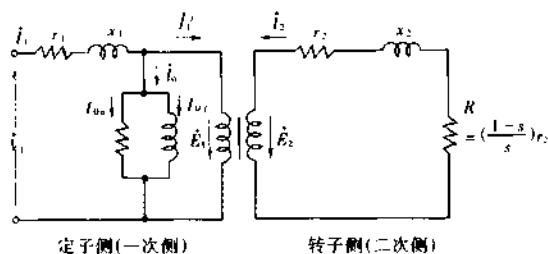


图 3.16 等效电路

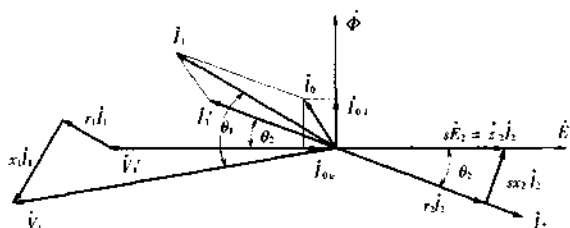


图 3.17 向量图

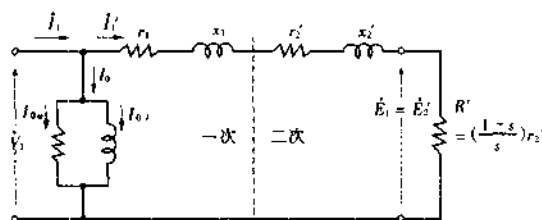


图 3.18 简化等效电路

3.4.1 简化等效电路

常用简化等效电路求作感应电动机的特性。简化等效电路是将励磁电路直接并接到电源电压上的形式。二次侧的绕组电阻和漏电抗等等都折算到一次侧,折算中用到匝数比 a ,它用一次和二

次感应电势之比求得。

$$a = E_1 / E_2$$

将各种二次侧之值折算到一次侧,有

$$r_2' = a^2 r_2 \quad R' = a^2 r_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$$

$$x_2' = a^2 x_2$$

$$E_2' = a E_2$$

3.4.2 由简化等效电路可求出的值

一次电流 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_1' \quad [\text{A}]$

励磁电流 $I_0 = V_1 \sqrt{g_0^2 + b_0^2} \quad [\text{A}]$

一次负荷电流 $I_1' = \frac{V_1}{\sqrt{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad [\text{A}]$

一次输入功率 $P_1 = p_i + p_{e1} + p_{e2} + P_0 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad [\text{W}]$

一次铁耗 $p_i = V_1 I_0 \cos \theta_0 = V_1^2 g_0 \quad [\text{W}]$

一次铜耗 $p_{e1} = I_1'^2 r_1 \quad [\text{W}]$

二次输入功率 $P_2 = p_{e2} + P_0 = I_1'^2 r_2' / s \quad [\text{W}]$

二次铜耗 $p_{e2} = I_1'^2 r_2' = s P_2 \quad [\text{W}]$

二次输出功率 $P_0 = I_1'^2 R' = I_1'^2 r_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) = (1-s) P_2 \quad [\text{W}]$

二次效率 $\eta_0 = \frac{P_0}{P_2} = \frac{(1-s)}{P_2} P_2 = 1-s$

效率 $\eta = \frac{P_0}{P_1}$

3.4.3 圆图

(1) **等效电路和圆图** 若根据简化等效电路画向量图,则一次负载电流向量顶端的轨迹将通过半圆。半圆的直径为 $V/(x_1 + x_2)$,若端电压为定值,则无论负载多大,都可在圆图上求到。

(2) 圆图的画法

(a) 图中纵坐标表示电压,而对于电流和功率,表示其有功

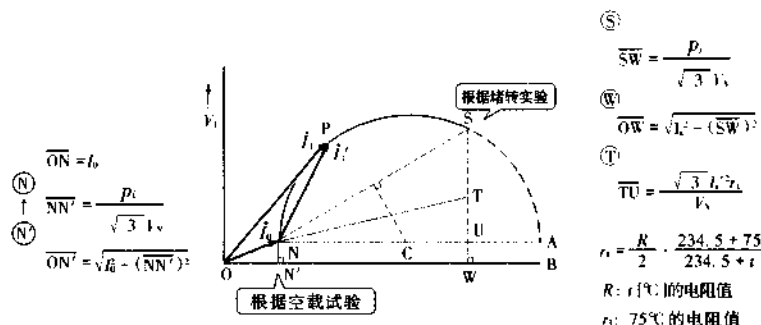


图 3.19 圆图的画法

分量*。

可用 200mm 长度代表额定电流的大小,这就定出每 mm 代表多少电流的电流比例尺。

功率比例尺为电流比例尺 $\times \sqrt{3} \times$ 额定电压。

(b) 根据空载试验 (额定电压时的空载电流 I_0 和空载输入功率 P_1), 定出 N 和 N' 点。

(c) 根据堵转试验 (将转子堵转, 滑环短路, 使一次绕组电流为额定 I_N , 求出一次电压 V_s' 和一次功率 P_1') 定出 W 和 S 点。

作 \overline{NS} 的垂直平分线, 它与 \overline{NA} 的交点 C 就是圆图的圆心。

以 C 为圆心, 以 \overline{NC} 长度为半径, 画出 \overline{NSA} 半圆。

(d) 根据绕组电阻测量 (测量各端子间的一次绕组电阻, 求出平均值并换算到 75°C 时的值), 求出 r_1 , 把 \overline{NS} 的大小换算成电流 (称为一次短路电流, 以 I_s' 表示) 值, 由此定出 T 点。

(3) 求特性方法

(a) 令 \overline{NS} 延长线和 \overline{OB} 的交点为 D , 由 D 向上引垂直线, 根据任意功率 $P[\text{kW}]$, 求出 H 点。

(b) 通过 H 点作平行于 \overline{DS} 的直线, 与圆周交于 P 点。

(c) 由 P 点向下作垂直于 \overline{OB} 的直线, 与 \overline{DS} 交于 a , 与 \overline{NT} 交于 b , 与 \overline{NU} 交于 c , 与 \overline{OB} 交于 d 。

* 横坐标表示无功分量。——译者注

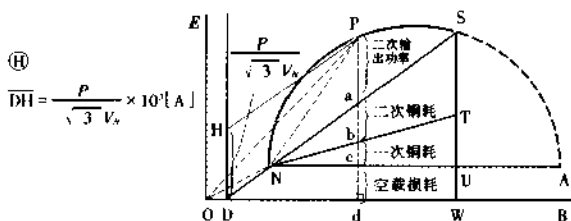


图 3.20 利用圆图求运行数据

[求出的运行数据]

以电流比例尺表示的有： \overline{ON} 为空载电流， \overline{NP} 为一次负荷电流， \overline{OP} 为一次电流

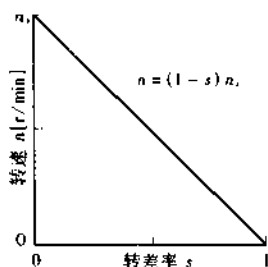
以功率比例尺表示的有： $\overline{HD} = \overline{Pa}$ 为二次输出功率， \overline{ab} 为二次铜耗， \overline{bc} 为一次铜耗， \overline{cd} 为空载损耗， \overline{Pb} 为二次输入功率， \overline{Pd} 为一次输入功率
转差率可用 $\overline{ab} / \overline{Pb}$ 表示，效率用 $\overline{Pa} / \overline{Pd}$ 表示，功率因数 $\cos \theta_1$ 用 $\cos \angle EOP$ 求得

3.5 三相感应电动机的特性

表 3.1 三相感应电动机的特性表

类型	额定 输出 功率 [kW]	极数	同步转速 [r/min]		全负荷特性				空载 电流 I_0 [A]	起动 电流 I_s [A]
			50[Hz]	60[Hz]	转差率 s [%]	效率 η [%]	功率因 数 $\cos \phi$ [%]	电 流 I_1 [A]		
低压 笼型	0.75	4	1500	1800	7.5	75 以上	73.0 以上	3.8	2.5	23 以下
	1.50	4	1500	1800	7.0	78.5 以上	77.0 以上	6.8	4.1	42 以下
	3.7	4	1500	1800	6.0	82.5 以上	80.0 以上	15	8.1	97 以下
	3.7	6	1000	1200	6.0	82.0 以上	75.5 以上	16	9.9	105 以下
低压 绕线 型	7.5	4	1500	1800	5.5	83.5 以上	79.0 以上	23	12	42 以下
	22	6	1000	1200	5.0	86.5 以上	82.0 以上	85	36	155 以下
	30	6	1000	1200	5.0	87.5 以上	82.5 以上	114	48	210 以上
	37	8	750	900	5.0	87.0 以上	81.5 以上	143	59	220 以上

[注] 额定电压 200V, 电流为各相平均值。



额定功率和公制马力:

$$\begin{aligned} 1 \text{ PS} &= 1 \text{ 公制马力} = 735.5 \text{ W} \\ &= 0.736 \text{ kW} \\ &\approx 0.75 \text{ kW} \end{aligned}$$

(例) 22 kW = 30 PS

30 kW = 40 PS

37 kW = 50 PS

图 3.21 转差率和转速的关系

3.5.1 输入、输出和损耗的关系

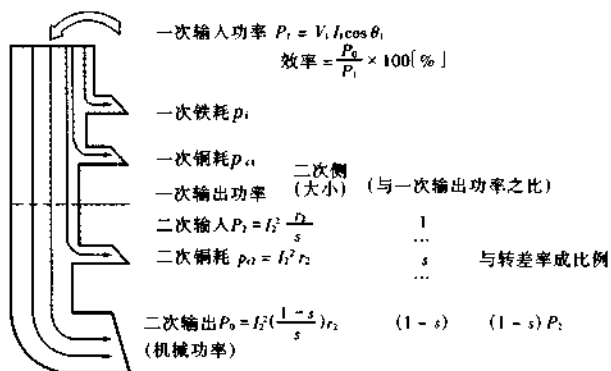


图 3.22 输入、输出和损耗的关系

3.5.2 转矩和同步功率

令角速度用 $\omega [\text{rad/s}]$ 、转速用 $n [\text{r/min}]$ 、转矩用 $T [\text{N} \cdot \text{m}]$ 、二次输出功率(机械功率)用 $P_0 [\text{W}]$ 表示,则

$$P_0 = \omega T = 2\pi n T / 60 \quad [\text{W}]$$

$$T = \frac{60 P_0}{2\pi n} \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

因为 $P_0 = P_2(1-s)$ 和 $n = n_s(1-s)$, 故

$$T = \frac{60 P_2 (1-s)}{2\pi n_s (1-s)} = \frac{60}{2\pi n_s} P_2 \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

这表示转矩和二次输入功率成正比, 转矩可用二次输入功率表示。

二次输入功率 P_2 又称为同步功率*。

3.5.3 转速特性曲线

下图横坐标表示转差率, 也即转速。

纵坐标表示转矩、一次电流、功率、功率因数和效率等。

该图表示在输入端施加额定电压时, 随着转差率的改变, 各

* 中文书中通常称为电磁功率。——译者注

量如何变化。这之中极为重要的是转差率和转矩的关系。

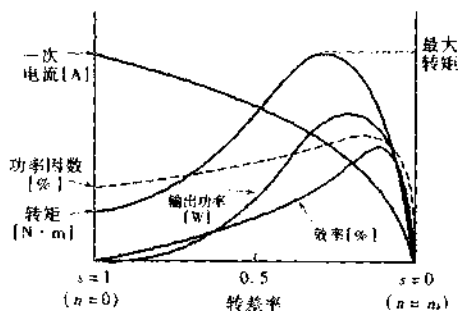


图 3.23 转速特性曲线

3.5.4 转矩的比例推移

$$T = \frac{60}{2\pi n_s} \frac{s E_2^2 r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2}$$

分子、分母都除以 s^2 , 得

$$T = \frac{60}{2\pi n_s} \frac{E_2^2 \left(\frac{r_2}{s}\right)}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}$$

因为除 r_2 和 s 外, 式中其他各量皆为定值, 故若 r_2/s 不变, T 应为同一值。就是说, 若二次电阻 r_2 增了 m 倍, 转差率 s 也增加 m 倍, 则 T 保持同一值。

为了得到同一转矩, 转差率应根据二次电阻按比例变化 (比例推移)。

对二次电阻能够改变的绕线型感应电动机可以利用比例推移原理。

利用比例推移这一原理, 就能够提高起动转矩或进行调速。

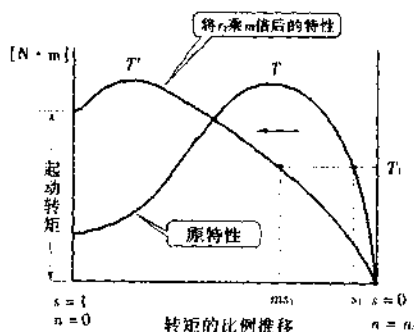


图 3.24 转矩的比例推移

3.5.5 最大转矩 (s 等于 r_2/x_2 时转矩最大)

$$T = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{E_2^2 \left(\frac{r_2}{s}\right)}{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2} = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{E_2^2 x_2}{\frac{r_2^2}{s} + s x_2^2}$$

除 s 以外, 其他各参数皆为常数, 故 $r_2^2/s + s x_2^2$ 为最小时的转矩最大。

最小原理:

$A > 0, B > 0$ 时, 若 $A \times B$ 为定量, 则 $A = B$ 时, $A + B$ 为最小。

这样, 设 $\frac{r_2^2}{s} \times s x_2^2 = r_2^2 x_2^2$ 为定量, 则由

$$\frac{r_2^2}{s} = s x_2^2 \quad \text{得} \quad s = \frac{r_2}{x_2}$$

3.5.6 输出功率特性曲线

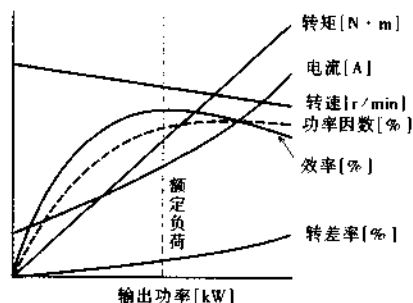


图 3.25 输出功率曲线

图中横坐标表示输出功率。

纵坐标表示功率因数、效率、转矩、一次电流、转速和转差率。

· 额定负荷 (额定输出功率) 附近的功率因数和效率有最大值。

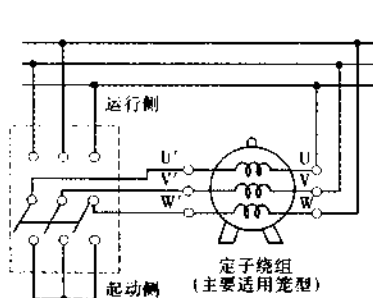
· 由于转速几乎不变, 所以具有恒速特性。

· 因感应电动机磁路有间隙,故功率因数较变压器差。

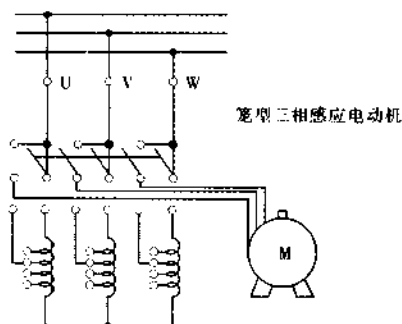
例题 4 极、60Hz 的三相感应电动机,二次每相电阻为 0.02Ω , 设转差率为 1 的每相漏电抗为 0.1Ω , 求产生最大转矩的转速。

$$\text{解: } s = \frac{r_2}{x_2} = \frac{0.02}{0.1} = 0.2 \quad n = (1-s) \frac{120f}{p} = 1440 \text{ [r/min]}$$

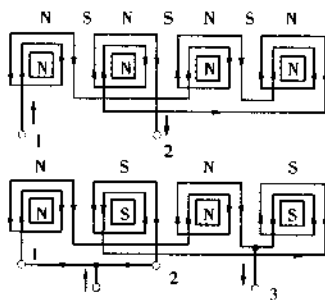
3.6 启动和运行



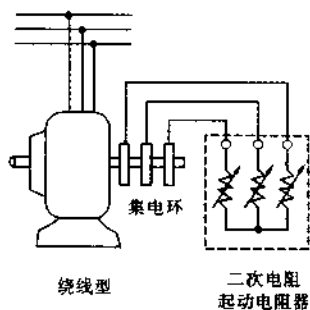
(a) Y-Δ启动法



(b) 用自耦变压器启动



(c) 变极调速法(主要用于笼型)



(d) 用二次电阻启动和调速

图 3.26 各种启动法

3.6.1 起动方法

起动方法	转子类型	方 法	特 征
全电压起动	笼型 3.7kW 以下	也称自接入起动、直接施加全电压	起动电流为全负荷时的数倍
Y-Δ 起动	笼型 5.5kW 左右	开始按星形接线, 起动后改为三角接线, 起动时绕组每相电压为运行时的 $1/\sqrt{3}$ 倍	起动电流和转矩为全电压起动时的 $\frac{1}{3}$ 倍
起动用自耦变压器	笼型 15kW 以上	用三相自耦变压器降低电压起动, 起动后立即切换为全电压	能限制起动电流
机械起动	笼型小型电机	用液力式或电磁式离合器将负荷接于空载的电机	有离合器等设备的特殊场合
用起动电阻器起动	绕线型 75kW 以下	利用起动转矩比例推移原理使二次电阻增至最大	起动电流小, 还可调速
起动电阻器 + 控制器	75kW 以上	起动器和速度控制器分别设置	

3.6.2 调 速

感应电动机全负荷时转差率约为百分之几, 从这种电动机的转速特性来看, 调速较难。除了改变绕线式感应电动机二次电阻以外, 别的方法可以说都是特殊的。

种 类	方 法	特 征	应用实例
改变电源频率的方法	根据 $n_s = 120f/p$, 同步转速随电源频率而变化	需要有独立可变频率电源	压延机、机床、船舶
改变极数的方法	同一槽内嵌放不同极数绕组, 改变定子绕组接线	用于笼型多速电动机	机床、升降机、送风机
改变二次电阻的方法	利用转矩的比例推移原理, 二次电阻和转差率成正比	二次铜耗大、效率差、负荷变化时速度不稳定	卷扬机、升降机、起重机

练习題

1. 功率 22kW、6 极、60Hz 的三相感应电动机全负荷时的转差率为 5%，问该电动机全负荷时的转速为多少？

2. 有一台 200V、功率 15kW 的三相感应电动机。若全负荷时功率因数为 80%，效率为 85%，问全负荷电流为多少？

3. 有一台全负荷运行的三相感应电动机，其电压为 200V，功率为 30kW，频率为 50Hz，极数为 4，转速为 1425r/min。求该电动机的同步转速、转差率、转矩、二次输入功率和二次铜耗。

4. 有一台 6 极、60Hz 的绕线型三相感应电动机。二次一相的电阻为 0.01Ω ，转差率为 20% 时转矩最大。为了使该电动机在起动时有最大转矩，在二次每相接入多大电阻为好？

5. 使用起动用自耦变压器在 65% 额定电压下起动，三相感应电动机的起动转矩为多大？

6. 有一台 4 极的三相笼型感应电动机。欲采用改变频率的方法调速，设转速变化范围为 800 ~ 2000r/min，问频率的相应变化范围如何？

IV

各种感应电动机

特殊笼型感应电动机

普通笼型感应电动机有许多优点，但其缺点是：虽然起动电流大，但起动转矩却不大。特殊笼型把起动特性差的普通笼型改进了。改进工作是使二次绕组的电阻在起动时变大，运行时变小。

单相感应电动机

一般家庭的电源都是单相交流，即使有数百瓦功率的场合，也常使用单相感应电动机。因为单相交流不能产生起动转矩，所以要用各种方法使电机产生起动转矩。

4.1 特殊笼型三相感应电动机

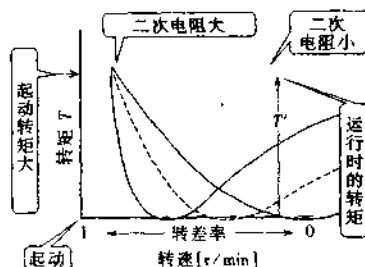


图 4.1 二次电阻和转矩的关系

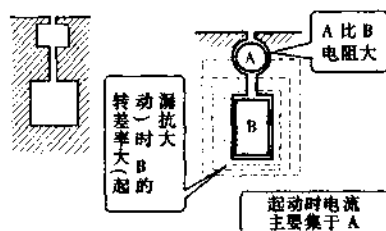


图 4.2 双笼转子的槽型

特殊笼型 (根据转子 槽型分类)	1. 双笼式 2. 深槽式
特殊笼型 (根据特性 分类)	甲). 1 类 (K1) 起动转矩 100% 以上 乙). 2 类 (K2) 起动转矩 150% 以上
普通笼型	功率 3.7kW 不满
特殊笼型	功率 5.5kW 以上
绕线型	功率 5.5kW 以上

图 4.3 特殊笼型的分类和功率

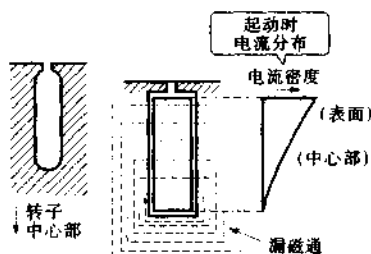


图 4.4 深槽式转子的槽型

4.1.1 特殊笼型比普通笼型的起动性能好

笼型的优点 ①牢固, ②操作简单, ③便宜, ④比绕线型的运行特性好, ⑤故障少, ⑥不要滑环。

绕线型的优点 ①起动性能好, ②容易调速。

特殊笼型是一方面持有笼型, 另一方面力求得到起动性能好这一绕线型的优点。

特殊笼型按转子槽形的不同分为 (甲) 双笼型和 (乙) 深槽式。

4.1.2 双笼三相感应电动机

转子(二次侧)导体条为双层笼状, 外侧导体条的电阻比内侧的大。

内侧导体条的漏电抗远比外侧的大。

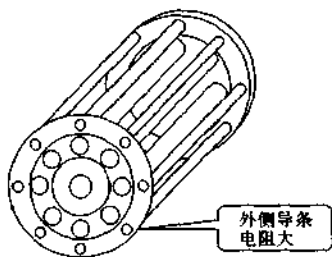


图 4.5 双笼型转子

起动时二次侧频率和电源频率相近, 转速提高后, 频率下降。根据电抗 $x = 2\pi fL$ 可知起动时电抗大。因此, 起动时电流集中在电阻大的外侧导体条。由于二次侧电阻变大, 故起动转矩变大。

转速增加, 电流集中到电阻小的内侧导体条, 转矩也增大。

4.1.3 深槽式笼型三相感应电动机

因为起动时二次侧频率高, 所以槽内导条离中心近的部分漏电抗变得很大, 起动时电流分布很不均匀, 离中心近的部分和表面附近的电流分布差别很大, 电流向外侧偏离。因此, 二次电阻变大, 起动转矩增加。转速提高时, 电流分布趋于均匀, 具有普通笼型的特性。

4.2 单相感应电动机

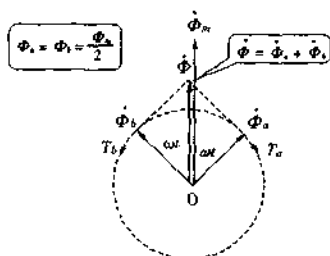


图 4.6 脉振磁通的分解

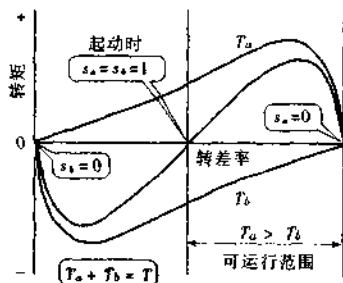


图 4.7 转矩 - 转速特性

种类和用途

分相起动感应电动机	缝纫机、钻床、浅井泵、办公用设备、台扇
电容起动单相感应电动机	泵、压缩机、冷冻机、输送机、机床
电容运行电动机	电扇、洗衣机、办公设备、机床
电容起动电容运行电动机	泵、输送机、冷冻机、机床
串励起动感应电动机	泵、输送机、冷冻机、机床
罩极单相感应电动机	电扇、电唱机、录音机

4.2.1 旋转原理

给单相感应电动机的一次绕组施加交流电压时，绕组产生一个脉振磁通。

这一脉振磁通可以分解成两个幅值皆为 $\frac{\Phi_m}{2}$ ，转速都为 ω ，转向相反的旋转磁场。

这两个旋转磁通中，顺时针转的以 Φ_a 表示，反时针转的为 Φ_b 。这就可以想象为两台感应电动机串接起来，一个有旋转磁通 Φ_a 的向右转，另一个有旋转磁通 Φ_b 的向左转。

向右转和向左转的二台单相感应电动机的转矩 T_a 、 T_b 合成

后的转矩 - 转速的关系曲线如图 4.8 所示。

因起动转矩为零, 最初如不在任意方向给予转矩, 电机就不会旋转。

根据使电机产生起动转矩的方法不同, 可划分为不同类型的单相感应电动机。

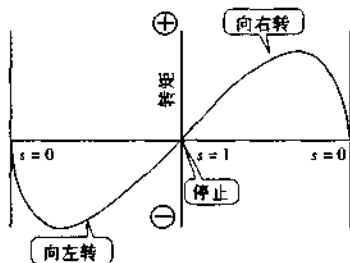


图 4.8 转矩 - 转速曲线

由以上说明可知, 若使单相感应电动机产生一定起动转矩, 它就旋转。旋转中的三相感应电机, 一相保险丝熔断后, 仍作为单相感应电机继续旋转就是例证。

4.2.2 各种单相感应电动机

(1) 分相起动式单相感应电动机 在定子上另装一个与主绕组 M 在空间上相垂直的起动绕组 A。

起动绕组 A 匝数少, 电抗小, 但用细线绕成, 故电阻大。

若给这两个绕组施加电压 V , 则主绕组中电流相位较电压相位滞后很多。但因起动绕组电阻大, 电抗小, 故其电流较电压滞后不多。

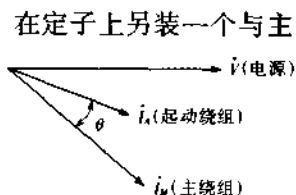


图 4.9 起动时电流向量图

在这两个电流 I_A 和 I_M 间产生相位差 θ , 两个绕组就会在气隙

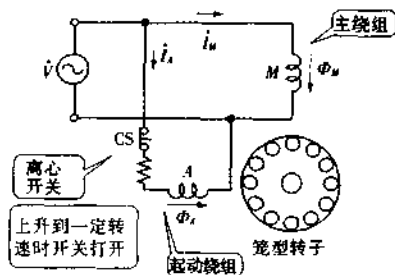


图 4.10 分相起动电路图

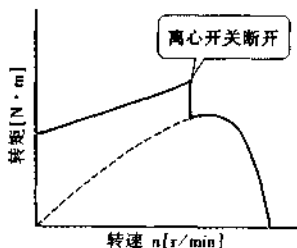


图 4.11 转速 - 转矩曲线

中形成一个椭圆形旋转磁场,这样转子就开始旋转。

转速达到 70% ~ 80% 同步转速时,离心开关 CS 动作,起动绕组自动从电源断开,以减少损耗。

【特征】结构简单,但起动转矩小。

200W 以下使用。

为了改善起动特性,有的做成斜槽。

(2) 电容起动单相感应电动机 在起动绕组 A 回路中串联接入一个电容 C_s , 就成为分相起动的又一种形式。

【特征】主绕组电流 I_m 和起动绕组电流 I_a 的相位差约为 90° , 在气隙中将形成一个接近圆形的旋转磁场。

起动转矩大起动电流小。

可做到 400W。

运行中,起动绕组一直串着电容器不断开,此单相感应电动机叫电容运行电动机。电容运行电动机运行特性好,功率因数约达 90%。

(3) 串励起动的单相感应电动机 定子只有主绕组,转子如直流电动机,带有换向器的绕组。

运行中靠离心力将换向器短路,电刷 2 个 1 组,用粗线短路。

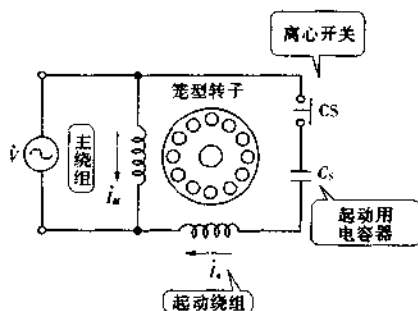


图 4.12 电容起动电路图

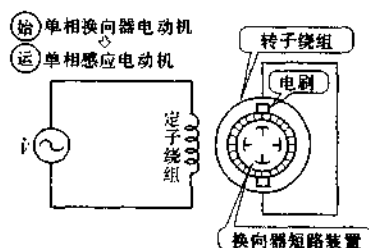


图 4.13 串励起动的电路图

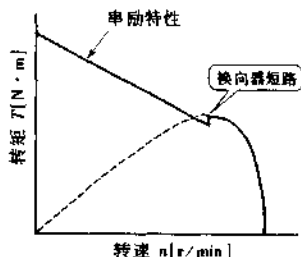


图 4.14 转矩 - 转速特性

[特征] 起动时,单相电动机具有直流串励特性,起动转矩大。

到达 70% ~ 80% 同步转速时换向器自动短路,作为单相感应电动机运行。

形状大,价格高。

(4) 罩极式单相感应电动机 定子一部分作成凸极状,在磁极端部边上装有线圈,这称为罩极线圈。

[特征] 因结构简单,故可作为极小的电动机应用。

损耗大,效率差。

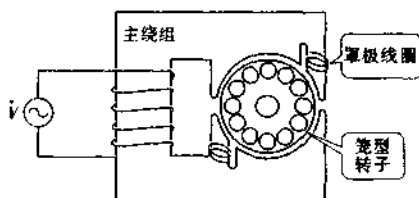


图 4.15 罩极式电动机的电路图

练 习 题

1. 指出下面关于特殊笼型三相感应电动机的叙述错误:

- (a) 特殊笼型中有双笼和深槽式。
- (b) 特殊笼型三相感应电动机改善了普通笼型起动性能差的缺点。
- (c) 起动时双笼转子中的电流主要在电阻大的外侧导条, 内侧导条电流很少, 故起动转矩大。
- (d) 按特性分类, 特殊笼型有 1 类和 2 类的区分。
- (e) 深槽式笼型电动机起动时转子表面附近的导体部分漏磁通多, 因和这部分电流交链多, 故这部分电流变小。

2. 指出下面关于单相感应电动机的叙述错误:

- (a) 三相感应电动机在单相电源下也能旋转。
- (b) 不采取方法使单相感应电动机产生起动转矩, 它不旋转。
- (c) 分相起动时, 主绕组和起动绕组并联接于电源。
- (d) 串励起动时, 电机是作为单相交流串励电动机动作, 转速达到一定程度后, 电机将作为单相感应电动机运行。
- (e) 电容运行电动机的功率因数为 60% 左右。



同步发电机

家庭和工作单位使用的电，都是由电力公司用交流供给，频率为 50Hz 或 60Hz，极为准确。一般家庭用单相 100V(100V 为日本使用的电压等级。——译者注)，但从发电到输配电都是用三相。虽然水力发电、火力发电、核电等使发电机旋转的方式不同，但所用的发电机都是同步发电机。发电厂使用的发电机容量大，水轮发电机容量达 30 万千瓦，火力发电机用到 100 万千瓦以上。像陀螺那样立着旋转的水轮发电机和使用高压蒸汽高速旋转的汽轮发电机的原理和结构将是本章的学习内容。

5.1 同步发电机的原理

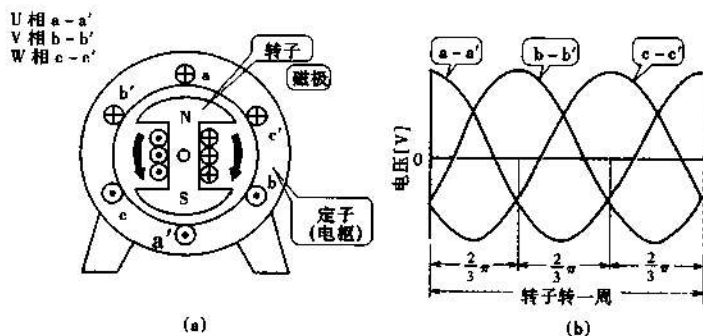
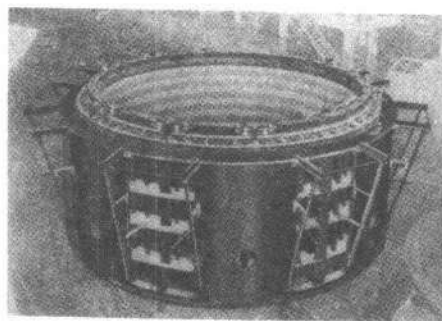


图 5.1 三相交流的产生



(a) 定子



(b) 转子

图 5.2 水轮发电机的定子和转子

5.1.1 交流电压的产生

自行车灯用的发电机就是交流发电机。

一般说来,发电厂的发电机就是交流发电机的代表。

图 5.3 为其原理图,带有磁极的转子旋转时,定子的电枢导线就感应出交流电压。

因为这是电磁感应作用,故可按弗莱明右手定则确定电势(产生电压)的方向。

NS 极交替向电枢导线靠近,就使电势方向改变,这样就得到交流电压。

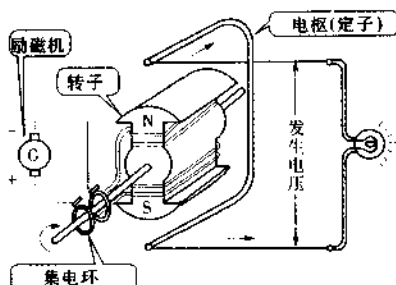


图 5.3 原理图

5.1.2 磁极数和同步转速

用上面的原理图,举例说明了磁极旋转形成的旋转磁场。同步发电机差不多都是这种方式。自行车灯用的发电机,转子使用永久磁铁。大型发电机用直流电流流过线圈使磁极磁化,直流电源是依靠直接接在转子轴上的称为励磁机的直流发电机供给的。

设磁极数为 p ,发出的交流频率为 $f[\text{Hz}]$,转速(同步转速)为 n_s ,则同步转速用下式表示:

$$n_s = 120f/p \quad [\text{r/min}]$$

因为电力公司供出的电力的频率是准确的 50Hz 或 60Hz,所以在结构上极数已确定的发电机必须以极稳定的转速旋转。

5.2 同步发电机的结构和种类

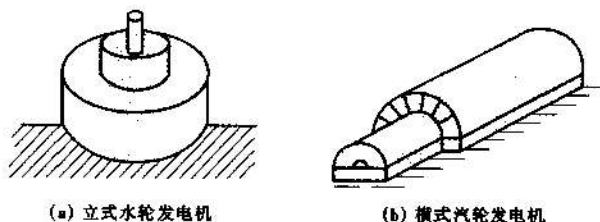


图 5.4 同步发电机的种类

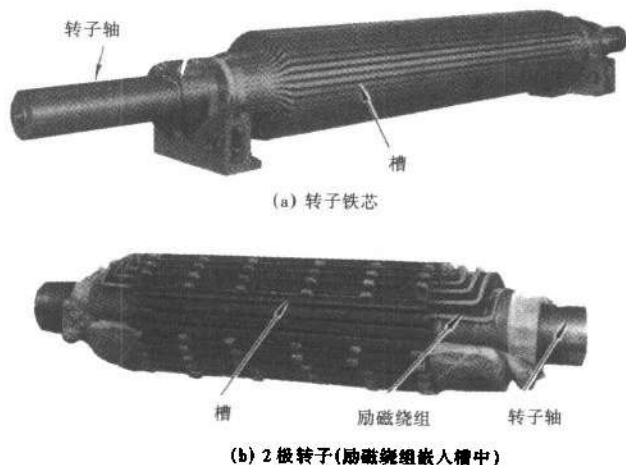


图 5.5 汽轮发电机的转子

5.2.1 同步发电机的种类

(1) 转子	$\left\{ \begin{array}{l} \text{a. 旋转励磁式} \\ \text{b. 转子电枢式} \\ \text{c. 感应式} \end{array} \right.$	<p>几乎全部同步发电机</p> <p>小型特殊发电机</p> <p>高频电源用</p>
--------	--	--

- | | | | |
|--|---|-----------|-----------------|
| (2) 原动机 | { | a. 水轮机 | 150~ 1200r/min |
| | | b. 汽轮机 | 1500~ 3600r/min |
| | | c. 活塞式发动机 | 100~ 1000r/min |
| (3) 轴的布置 | { | a. 立式 | 低速水轮发电机 |
| | | b. 横式 | 高速用, 汽轮发电机 |
| (4) 冷却 a. 空气冷却 b. 气体冷却 c. 水冷 d. 油冷 | | | |

5.2.2 水轮发电机

常见的情况是把水力发电用的发电机直接接于弗朗西斯式(或其他型式的)水轮机。虽然转速与水的落差有关, 但转速一般比较低。

极数从 6 极、8 极到 32 极、48 极, 极数多。

发电机轴的布置方式: 立式用于大型低速水轮发电机。

水轮发电机中用凸极转子。

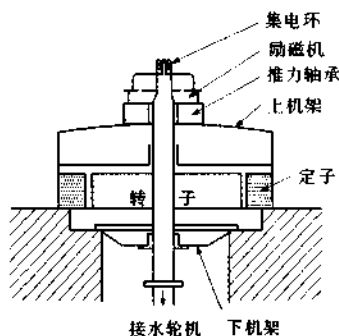


图 5.6 立式水轮发电机的简图

5.2.3 汽轮发电机

火力发电站和核电站都是以蒸汽透平作原动力使发电机高速旋转。

一般磁极数为 2 极, 因为频率为 50Hz 或 60Hz, 所以每分钟转数必须为 3000 或 3600 转。

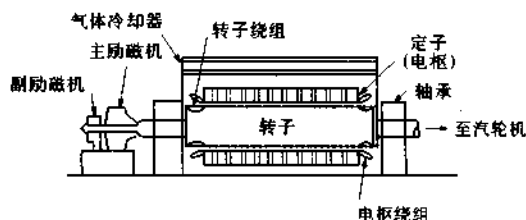


图 5.7 汽轮发电机

由于速度高,为了使离心力小,就得把直径做小,轴向很长。

为了减少风损耗,转子不做成凸极式,而是圆筒形状的隐极式。

为了提高冷却效果,大容量汽轮发电机不用空气冷却,改用氢气循环。氢和空气混合将爆炸,故须有闭锁结构。

5.2.4 活塞式发动机作原动机的发电机

作为原动机的发动机有汽油发动机和内燃机等。

汽油发动机作原动机的发电机因小型便于携带而被应用,一般来说,内燃机发电机因其效率和起动性能好而被应用。

转速 $500 \sim 750 \text{ r/min}$, 输出功率大部分在 1000 kW 以下。

用途: 工厂等紧迫时用, 偏僻的地方照明用, 受电或自备发电单位的事故备用。

以发动机为原动机的发电机是以往复运动带动旋转的, 因而转速可能忽快忽慢。为了减少这种情况, 可加装飞轮, 或用其他方法达到整速的效果。

5.2.5 自励式同步发电机

以发动机为原动机的发电机一般不带励磁机。发电后得到的交流电压经半导体整流器整流后的直流电压, 用来使磁极磁化。和直流发电机一样, 发电最初阶段, 采取利用剩磁发电的方法。

5.2.6 电枢绕组绕法

集中线圈 每极每相的槽数为 1, 1 个线圈边的各导体无相位差。

分布线圈 每极每相的线圈分散嵌放在 2 个以上槽内。相邻两个槽内的线圈边的电势不同相。实际用分布线圈。

整距线圈 线圈节距等于磁极节距。

短距线圈 线圈节距小于磁极节距。

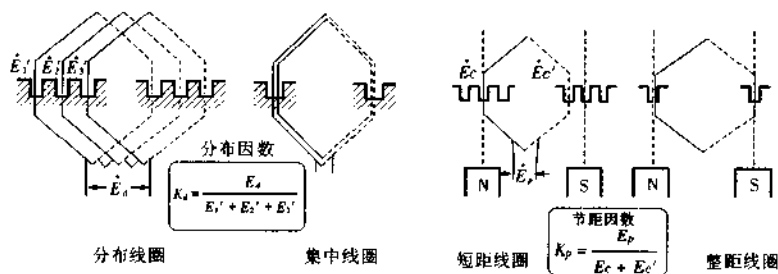


图 5.8 电枢绕组绕法

5.2.7 绕组系数和感应电势幅值

设发电机电压的频率为 f [Hz], 一相的全匝数为 w , 每极全磁通为 Φ [Wb], 则一相的感应电势 E [V] 为

$$E = 4.44 f w \Phi \text{ [V]}$$

上式适用于集中线圈的短距绕法。

一般常用分布线圈短距绕法, 这时

$$E = 4.44 K f w \Phi \text{ [V]}$$

式中 K 称为绕组系数, 它是分布系数 K_d 和短距系数 K_p 的乘积。

$$K = K_d \cdot K_p < 1 \text{ (因 } K_d, K_p \text{ 都小于 } 1)$$

同步发电机电枢绕组采用分布线圈和短距绕法, 虽然电势小了, 但波形更接近正弦。

5.3 同步发电机的特性

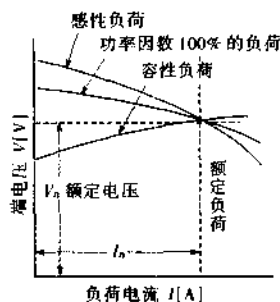


图 5.9 外特性曲线

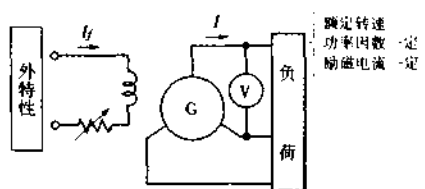


图 5.10 外特性测量电路

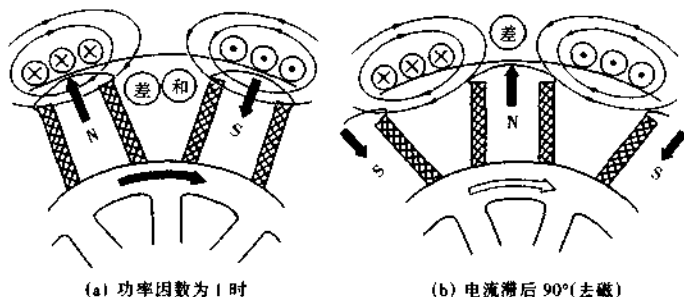


图 5.11 电枢反应

5.3.1 电枢反应和漏电抗(参看图 5.11)

(1) **电枢反应** 电枢(定子)绕组有三相交流电流时,和感应电动机一样产生磁场。

根据电枢旋转磁场和转子磁极在空间的相对位置不同,电枢感应电势受到的影响也将不同。

(a) **功率因数为 1 时** 电枢电流和感应电势无相位差时电枢产生的磁场和转子磁极产生的磁场相交,磁通略为减少。

(b) **电流滞后 90° (电感负荷) 时** 电枢电流和感应电势的相位差为 90° ,电枢绕组在电流最大时的位置和转子磁极的位置

错开。转子磁极和电枢绕组产生的磁场互相抵消,起去磁作用。

(c) **电流超前 90° 时** 和前面分析方法相似, 结论是电枢绕组相对转子错开的位置相反, 磁场增强, 即起增磁作用。

(2) **电枢漏电抗** 电枢绕组漏磁通有三种, 如图 5.12 所示。漏磁通只和电枢绕组交链, 产生漏电势。对应这部分电压降的阻抗称为漏电抗。

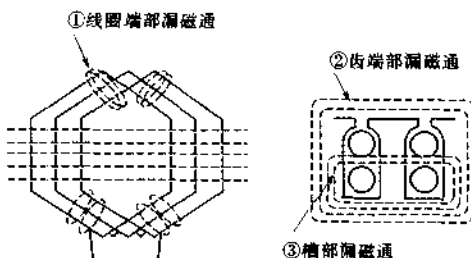


图 5.12 电枢漏磁通

5.3.2 同步电抗

计算电枢电路时, 电枢反应随功率因数而不同。如用一种电抗表示就方便了。

设对应电枢反应的电抗为 x_a , 电枢绕组漏电抗为 x_l , 则两者之和 x_s 称为同步电抗。同步电抗 x_s 和电枢绕组电阻 r_a 之和称为同步阻抗 $Z_s = r_a + jx_s$ 。

5.3.3 等效电路和向量图

下面介绍三相同步发电机一相等效电路和向量图。

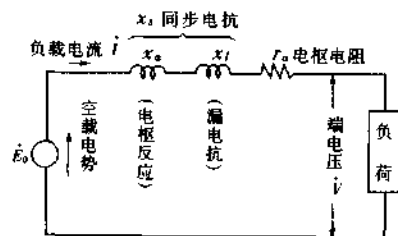


图 5.13 等效电路



图 5.14 向量图

设空载感应电势为 E_0 , 有负荷时端电压为 V , 负荷电流为 I , 则

$$V = E_0 - IZ_s$$

式中 Z_s 为同步阻抗。

空载感应电势 E_0 和端电压 V 之间的相位差称为功率角 δ 。

5.3.4 特性曲线和短路比

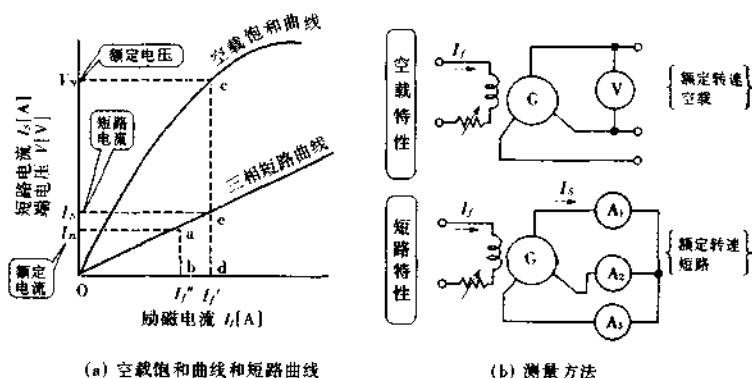


图 5.15 特性曲线及其测量方法

(1) 从空载饱和曲线和三相短路曲线, 可求同步阻抗。

一相的同步阻抗值 $Z_s [\Omega]$ 为

$$Z_s = \frac{V}{\sqrt{3} I_s} = -\frac{\overline{cd}}{\sqrt{3} \times \overline{de}} \frac{[V]}{[A]} \quad (\text{励磁电流为 } \overline{Od})$$

(2) 短路比 在额定转速下, 产生空载额定电压 V_n 所需励磁电流 I_f' 与产生等于额定电流 I_N 的短路电流所需的励磁电流 I_f'' 之比为称为短路比。

根据上面特性曲线, 短路比为

$$K_s = \frac{I_f'}{I_f''} = \frac{\overline{Od}}{\overline{Ob}}$$

(3) 短路比和同步发电机性能 短路比小, 意味着电机的

* 原书误为“短路电流”。——译者注

同步阻抗大,电枢反应强。电枢反应强的表示气隙小,转子磁极的磁势比电枢的磁势的作用小,说明铜或铁励磁材料得到减缩。

短路比小的同步机体轻便宜,但特性上余地小。

5.4 同步发电机的并联运行

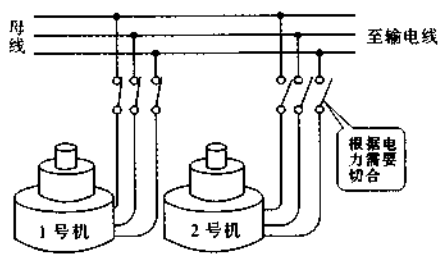


图 5.16 同步发电机的并联运行

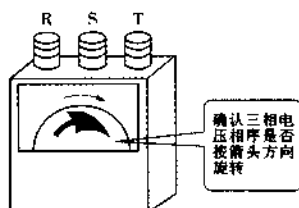


图 5.17 相序计

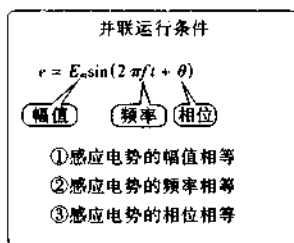


图 5.18 并联运行条件

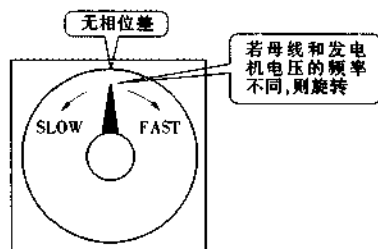


图 5.19 同步检测仪

5.4.1 为何要并联运行

根据负荷的大小常需要多台发电机同时运行。

发电机的效率在全负荷附近时最大，负荷小时，运行的台数减小可使效率提高。

5.4.2 并联运行的条件

- (1) 感应电势的幅值相等 (用电压表检测)
- (2) 感应电势的频率相等 (频率计)
- (3) 感应电势的相位相同 (同步指示器)
- (4) 感应电势的波形相同 (一般为正弦波)
- (5) 相序方向相同 (相序计)

5.4.3 并联运行步骤

(1) 发电机开动起来, 达到额定速度。

(2) 调节励磁电阻 R_2 , 达到额定电压。

(3) 调节发电机 G_2 的转速和励磁, 使其等于母线的电压和频率。

(4) 合上 S_3 开关。

调整发电机 G_2 的输入, 并用同步指示器检测, 使 G_2 电压相位和母线相位相同。

(5) 用同步指示器(灯)确认同步后, 合开关 S_2 (并联运行)。

(6) 若将 G_2 的电势增加一些, 而 G_1 的电势减小一些, 则负荷由两发电机分担。

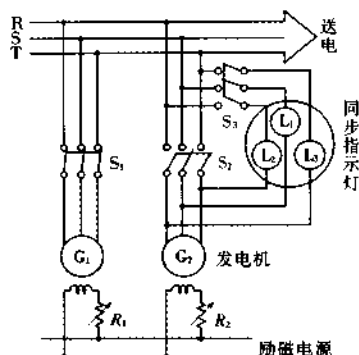


图 5.20 并联运行

练 习 题

1. 有一台 2 极汽轮发电机。为了得到频率为 50Hz 的交流,每分钟转速为多少?

2. 有一台极数为 12,转速为 500r/min,线圈总数为 108 个,一个线圈有 3 匝的三相同步发电机。每极有效磁通为 0.21Wb 时,发电机的端电压多大?

3. 有一台额定功率为 10000kVA,额定电压 6600V 的三相同步发电机。短路比为 1.25。问:

(a) 三相短路事故发生时,持续短路电流多大?

(b) 该发电机的同步阻抗多大?

4. 有一台额定电压为 6600V,额定功率为 5000kVA 的三相同步发电机。其空载端电压为 6600V 时,相对应的励磁电流为 200A,短路电流为 600A。求:

(a) 额定电流;

(b) 短路比;

(c) 同步电抗。

5. 有一台额定电压为 6600V,额定电流为 70A 的三相同步发电机,带有功率因数为 80% 的负荷运行时,所需的原动机输出功率多大? 计算中取发电机效率为 92%。

VI

同步电动机

同步电动机和同步发电机结构相同，和前面讲过的直流发电机可作为直流电动机使用一样，同步发电机也可以作为同步电动机使用。

同步电动机有以极数、频率所确定的同步转速，因而转速恒定。

从同步电动机的特性可知，其功率因数可以调节，能在功率因数 100% 下运行。

同步电动机的励磁电流和电枢电流之间的特殊关系可以用所谓的 V 形特性曲线表示。

同步电动机无起动转矩，起动麻烦。

因为有这些特性，所以这种电动机一般用于需要恒定速度的特殊场合。

6.1 同步电动机的原理和结构

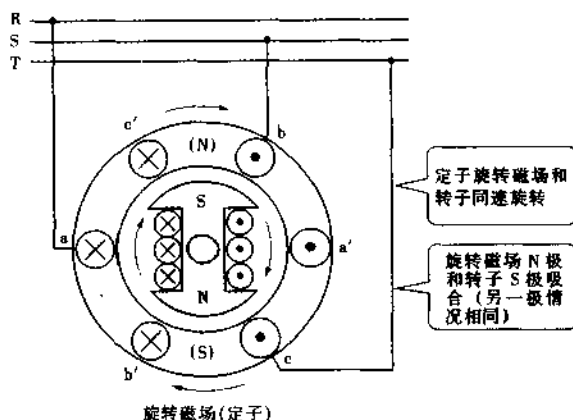


图 6.1 同步电动机的原理图

同步电动机和感应电动机的不同点

相同 定子产生旋转磁场。

不同	同步电动机	<ul style="list-style-type: none"> 转子是电磁铁； 转速和旋转磁场相同，以同步速度旋转，与负荷无关； 起动转矩为零。
	感应电动机	<ul style="list-style-type: none"> 转子为笼型或绕线型； 转速较旋转磁场低，有负荷时转差率变化； 起动转矩小但不为零。

6.1.1 同步电动机的原理

(a) 空载时不产生转矩 在旋转磁场和转子以同步速度旋转且完全空载的情况下，转子的 S 极和旋转磁场的 N 极在旋转中保持相同位置。

旋转磁场 N 极左右导体 (c' , b) 的电磁力方向可用左手定则确定，由图 6.2(a) 可知左右导体受力方向相反，但大小相同。因此，力互相抵消，不产生转矩。

(b) 负荷时旋转磁场和转子之间的位置偏移 δ 为旋转磁

场磁极和转子磁极之间的位置偏移角,因随负荷功率而变化,故称功率角。

转子滞后旋转磁场 δ 角, δ 最大为 $\pi/2[\text{rad}]$ 。与空载时不同,因转子的位置偏移,左右两边的导体受力的大小就有差别,虽然电磁力和旋转磁场方向相反,但这一力的反作用使转子产生转矩。

6.1.2 同步电动机的结构

与同步发电机结构相同,为了产生起动转矩,在转子上装有类似于感应电动机的笼型绕组的阻尼绕组*。

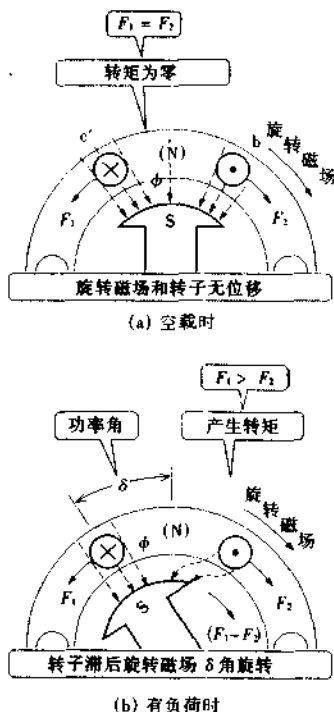


图 6.2 同步电动机的原理

* 阻尼绕组即起动绕组。——译者注

6.2 同步电动机的性质和特性

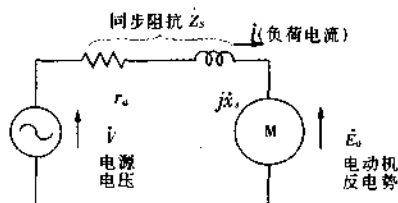


图 6.3 三相同步电动机一相电路

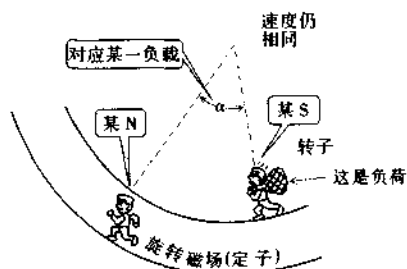


图 6.4

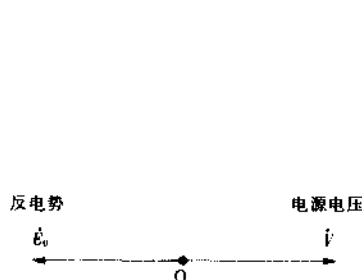


图 6.5 空载时的向量图

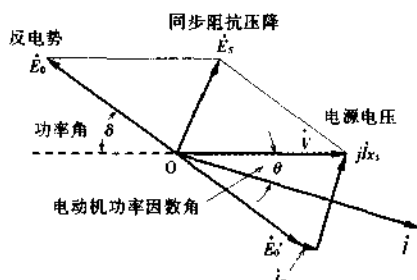


图 6.6 负荷时的向量图

6.2.1 同步电动机的向量图

(1) 空载时(参看图 6.5) 由于励磁(转子)磁通的作用,在同步电动机电枢(定子)绕组上感应电势。此电势 \dot{E}_0 和电源电压 \dot{V} 大小相同但相位差 180° 。 \dot{E}_0 为电源电压的反电势。

(2) 负荷时(参看图 6.6) 旋转的转子磁极总是比旋转磁场滞后 δ 角。电枢感应的电势 \dot{E}_0 也滞后 δ 角。

电枢绕组的电流 \dot{I} 为滞后电源电压 \dot{V} 的负荷电流,滞后相位角 θ 为电动机的功率因数角。

比感应电势 \dot{E}_0 差 180° 相位的电势 \dot{E}_s ,因与感应的电势 \dot{E}_0 相反,故相当于是由电源供给的电势。

6.2.2 输出功率和 $\sin\delta$ 成正比

若忽略电动机的损耗,则一相输出功率 P 为

$$P = VI\cos\theta = E_0' I\cos\phi$$

由于 $r_a \ll x_s$, 并设 $r_a =$

0, 则

$$V\sin\delta = Ix_s\cos\phi$$

$$I\cos\phi = \frac{V\sin\delta}{x_s}$$

$$P = \frac{E_0' V}{x_s} \sin\delta$$

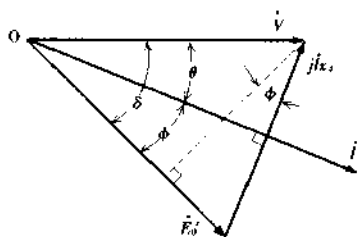


图 6.7 同步阻抗 $Z_s = jx_s$ 时的向量图

同步电动机输出功率 $P[W]$, 与电源电压 V 以及励磁电流保持一定时的功率角 δ 的正弦成正比。

6.2.3 转矩亦与 $\sin\delta$ 成正比

电动机功率 $P[W]$, 和转矩 $T[N \cdot m]$ 间的关系如下:

$$P = \omega T = 2\pi \frac{n_s}{60} T \quad n_s \text{ 为同步转速 } [r/min]$$

故

$$T = \frac{60}{2\pi n_s} P = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{E_0' V}{x_s} \sin\delta = K \sin\delta$$

$$K = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{E_0' V}{x_s} \quad \text{为常数}$$

故转矩和功率一样也正比于 $\sin\delta$ 。

6.2.4 转矩特性曲线

特性曲线的横坐标为功率角 δ , 纵坐标为转矩。

由于转矩与 $\sin\delta$ 成正比, 故在 $\delta = 90^\circ$ 时为最大。

功率角是电角度, 极数若

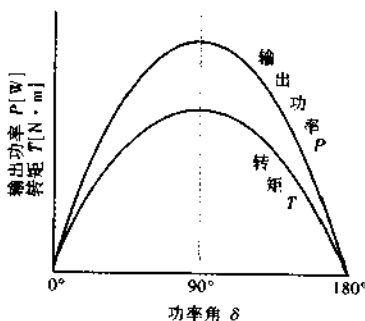


图 6.8 转矩特性曲线

多,则空间角小。

实际运行时的 δ 约为 20° 左右。

6.2.5 失步停转

同步电动机总是以同步转速旋转, 负荷增加时功率角变大, 转矩减小, 当不能承担负荷转矩时, 电动机停转。这称为失步, 此时的转矩称为失步转矩。实际的失步转矩在功率角为 $50^\circ \sim 70^\circ$ 的范围。这是指电动机在额定频率和电压下以正常的励磁运行时, 能够在 1 分钟时间内继续运行的最大转矩。

6.2.6 励磁和相位的关系

施加电源电压 V (保持不变), 当保持负荷转矩不变亦即输出功率 P_2 不变时, 调节励磁电流, 可使电压 V 和负荷电流 I 同相。

(1) 适当调节励磁电流, 使电压 V 和电流 I 达到同相时, 功率因数为 100%, 而负荷电流 (电枢电流) I 的幅值为最小 (这时的励磁称为正常励磁)。

(2) 减少励磁电流时感应电势 E_0' 减小, 功率角 δ 变大。电流 I 增大, 电流 I 滞后电压 V 。

(3) 增大励磁电流, 感应电势 E_0' 增大, 功率角 δ 变小。电流 I 亦增大, 电流 I 超前电压 V 。

电源电压 V 一定, 输出功率 $P = VI \cos \theta = \frac{VE_0'}{X_s} \sin \delta$ 一定

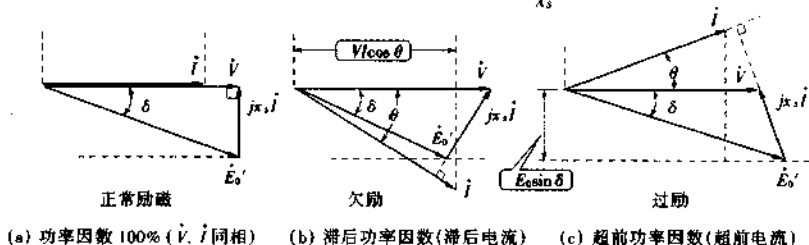


图 6.9 励磁和相位的关系

6.2.7 V形曲线(相位特性曲线)

转子励磁弱(欠励)时,电枢电流滞后电压,而励磁强(过励)时,电流超前。

表明电枢电流和励磁电流关系曲线就是相位特性曲线,也称V形曲线。这根据曲线的形状而得名。

功率因数为100%的点为曲线的谷。

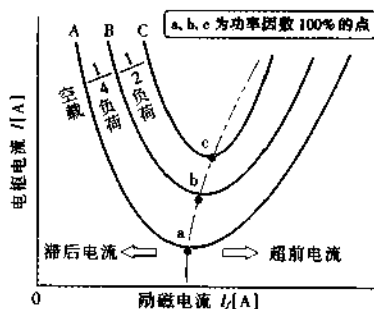


图 6.10 同步电动机的相位特性

6.3 同步电动机的起动方法

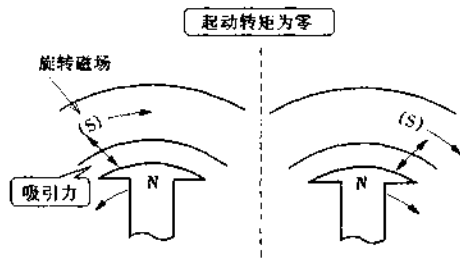


图 6.11 只有旋转磁场, 还不能转动

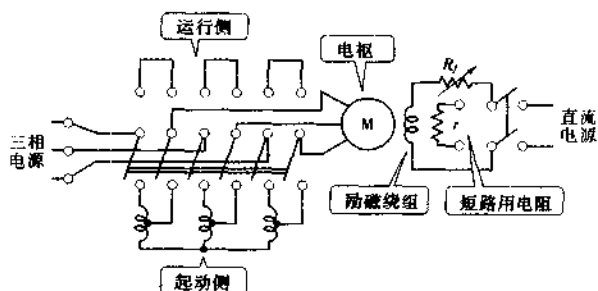


图 6.12 异步起动法

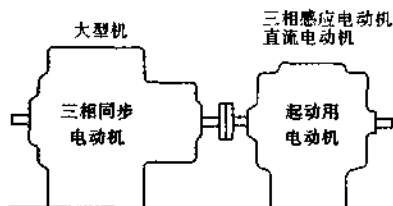


图 6.13 辅助电动机起动法

6.3.1 同步电动机的起动方法

同步电动机无起动转矩, 转子有惯量, 不能追从旋转磁场旋转。转子、定子互相之间的磁场 NS 作用在转子的力的左右两个方

向相等,电机不能旋转(参看图 6.11)。

(1) **异步起动法** 利用阻尼绕组(阻尼的作用见下一节)的起动方法,应用三相感应电动机笼型转子考虑方法。在转子磁极表面装设用短路环(端环)和导条做成的阻尼绕组。起动转矩虽然小,但笼型感应电动机还是有起动转矩的。

起动时电枢不施加全电压,通过起动补偿器、串联电抗器、起动变压器等把电压降低后起动。

为了防止起动时过高的感应电压将绕组损坏,在励磁电路中接入了电阻 r 。

先作为感应电动机起动,等接近同步转速时,再给励磁绕组施加直流电压(参看图 6.12)。

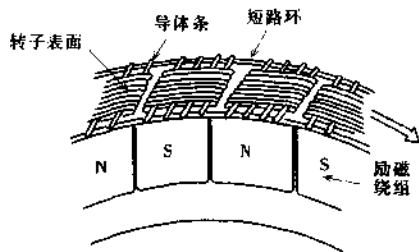


图 6.14 阻尼绕组(短路环、导条)

(2) **辅助电动机起动法** 用于大容量电动机,把起动用的三相感应电动机或直流电动机直接接于被起动电机上。先用辅助电动机将主机拖到接近于同步速度时,再用同步发电机并联运行的方法将同步电动机投入运行。之后切除起动用的辅助电动机电源,让其空转(参看图 6.13)。

6.3.2 同步电动机的振荡

当负荷、电源电压或频率发生变化时,功率角 δ 将过渡到新的功率角。此时由于转子的惯性,功率角将发生周期性的变化,这称为振荡。若激发起严重的振荡,将会失步,电动机将会停转。阻尼绕组有抑制这种震荡的作用(参看图 6.14)。

练 习 题

1. 下面是关于同步电动机的叙述,请指出错误:

- (a) 定子设有三相绕组,接上电源后将产生旋转磁场。
- (b) 转子保持与负荷大小相应的功率角,以同步转速旋转。
- (c) 起动转矩为零。
- (d) 功率基本与功率角的正弦成正比。
- (e) 滞后 $\pi/2$ 相位的电枢电流有去磁作用。
- (f) 在一定负荷下,若增强励磁,则可以在超前的功率因数下运行。

2. 额定转速为 600r/min, 额定频率为 60Hz 的同步发电机用辅助感应电动机起动。为了达到同步,该用几极的感应电动机?

3. 有一台额定电压为 200V, 极数为 4 极, 额定频率为 50Hz 的三相同步电动机。线电流为 40A, 功率因数为 96%, 效率为 87% 时, 转矩为多少 $\text{N} \cdot \text{m}$? 为多少 $\text{kg} \cdot \text{m}$?

4. 有一台端电压为 200V、电枢电流为 12A、功率因数为 100% 的三相同步电动机。星形接线, 一相同步电抗为 7Ω 。电枢绕组电阻和磁饱和不计。求下列各值:

- (a) 一相感应电压 (b) 功率角 (c) 电动机功率

VII

交流整流子电动机

转子带有整流子的电动机。

整流子电动机的种类中有单相交流用、三相交流用、电枢绕组和励磁绕组串联和并联等各种类型。本章选取单相串励整流子电动机和三相交流中多用的徐拉格型三相并励电动机(Schrage motor, 我国又称为转子馈电式的三相并励电动机。——译者注)进行说明。

单相可作交直流两用电动机,还可以做成高速旋转的,具有变速特性,可用于家用吸尘器中。三相徐拉格型电动机,靠调节电刷开角(间距),可自由改变速度,具有恒定转速特性等等都是本章学习的内容。

7.1 单相串励整流子电动机

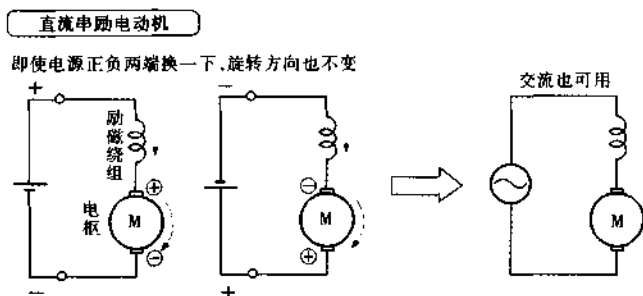


图 7.1 单相串励整流子电动机的原理

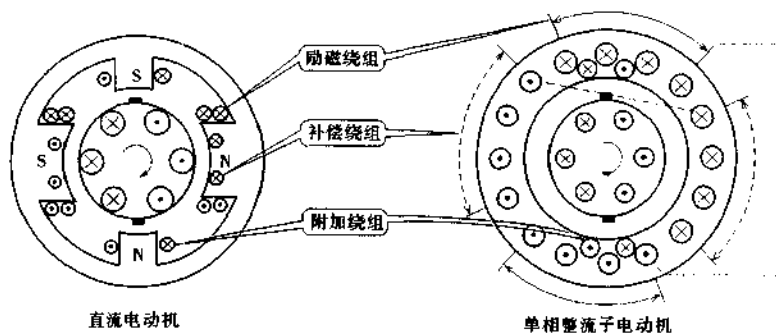


图 7.2 直流电动机和单相整流子电动机

7.1.1 原理和直流串励电动机相同

根据左手定则可知, 电流和磁场方向同时改变时, 力的方向不变。将直流串励电动机的电源极性对换, 因电枢电流和励磁电流同时改变, 故旋转方向不变。

就是说, 即使加交流电压, 该电机仍能作为电动机运行。

7.1.2 结 构(因为施加交流)

(1) 因磁通变化, 铁损增加, 故励磁磁路是硅钢片叠成的铁

芯;

(2) 因绕组电抗使功率因数下降,故励磁绕组匝数应减少;

(3) 为了补偿励磁绕组匝数减少而使转矩减小,故增加电枢绕组匝数;

(4) 为了减少因电枢绕组匝数增加而引起的电枢反应,故装补偿绕组;

(5) 由于脉振磁通的作用,使电刷产生的短路电流增大,整流作用困难,故增大电刷部分的电阻等等。

7.1.3 特性

(1) 因为电抗的作用,使加在电枢上的有效电压减小,在相同电流下,交流机比直流机转速低;

(2) 小功率时,交流、直流都可使用的电机称为交直流两用机(universal motor);

(3) 速度受负荷影响,为变速特性。

7.1.4 用途

家庭用电吸尘器、缝纫机、电钻、果汁搅拌机、转送机、电动卷门、交流电机车、放映机。

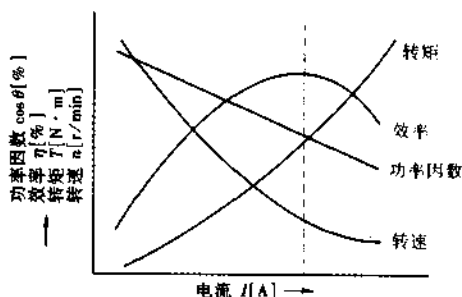


图 7.3 单相串励整流子电动机的特性

7.2 徐拉格型三相并联励磁电动机

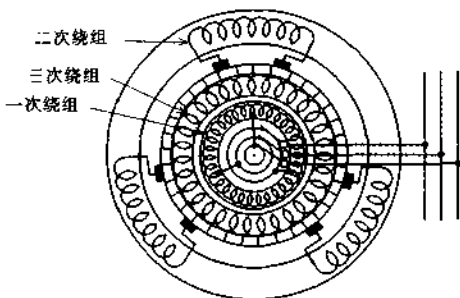


图 7.4 徐拉格电动机的原理

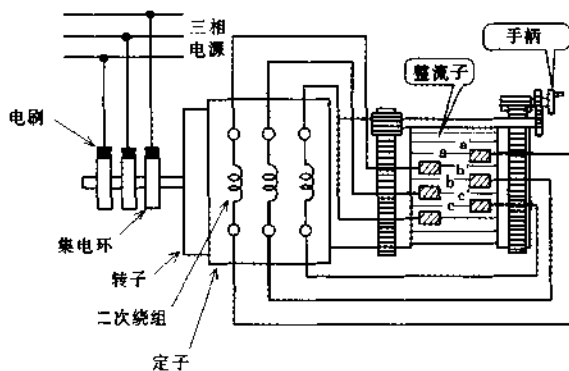


图 7.5 徐拉格电动机的接线

7.2.1 原理和结构

这种电动机可以看作是由绕线式三相感应电动机和其二次励磁组成，采用转子供电方式的并励换向器电动机。一次绕组装在转子上，通过滑环接于三相交流电源。二次绕组装在定子上，三个绕组组成三相绕组，各绕组的两端分别与电刷接于 aa' 、 bb' 、 cc' 。

三次绕组装在一次绕组同一槽内，和换向器连接。

电刷移动装置可调整整流子上互差 $2\pi/3$ 电角度的三个电刷 a, b, c 和另三个对应的 a', b', c' 之间的开角(间隔)。

7.2.2 电刷间隔和转速

电刷间隔三组同时改变时,二次绕组的电压将变化,电刷间隔宽,则转速较同步转速低;若电刷间隔缩小,以致两个电刷在整流子上紧并在一起(0°),即形成短路,则以同步速旋转。若进一步移动电刷使加于二次绕组的电压反相,则可以大于同步速旋转。

7.2.3 特性

- (1) 效率和功率因数都好;
- (2) 起动特性好;
- (3) 转速任调;
- (4) 有恒定速度特性;
- (5) 结构复杂,价格高。

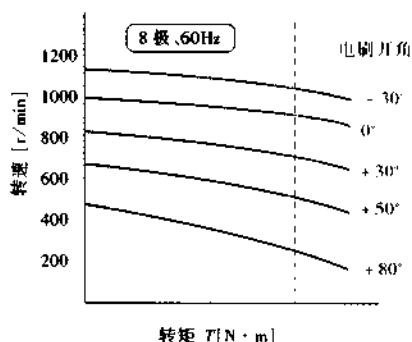


图 7.6 速度 - 转矩特性

7.2.4 用途

印刷机械,造纸机械,精纺机,卷扬机等,用途广。

练 习 题

1. 指出下列单相串励整流子电动机有关叙述的错误:

- (a) 这种电动机的原理和直流串联励磁电动机相同。
- (b) 这种电动机不仅电枢,励磁磁路也作成硅钢片叠成的铁芯。
- (c) 这种电动机的励磁绕组匝数减少,而电枢绕组增多。
- (d) 这种电动机整流作用比直流机好。
- (e) 这种电动机用于家庭缝纫机、放映机、搅拌机、小型电动工具等。

2. 指出下列徐拉格电动机有关叙述的错误:

- (a) 这种电动机有一次、二次、三次绕组。
- (b) 这种电动机的速度变化与转矩变化相比极小。
- (c) 这种电动机的速度可以改变,和直流串励电动机相似。
- (d) 这种电动机靠电刷移动可控制速度和改善功率因数。
- (e) 这种电动机可用于印刷机械、造纸机械、精纺机中。

VIII

小型电动机

计算机关联设备、工业用机器人的传动装置、摄像机、音响设备等等用的小型电动机，种类很多。本章仅以其中的伺服电动机、微型电动机和脉冲电动机进行说明。伺服电动机的伺服(servo)二字本来有奴隶的意思，按照指示动作是这种电动机用于自动控制中的功能。微型电动机意味它很小，是小尺寸和小功率电动机的总称，近年来用途愈来愈广。脉冲电动机也称为步进电动机，它是根据施加的脉冲一个角度一个角度地转动，是根据脉冲频率而改变转数的电动机，这种电动机的用途也很广。

8.1 伺服电动机

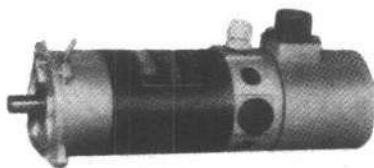


图 8.1 伺服电动机的外观

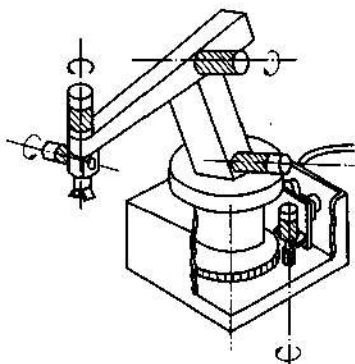
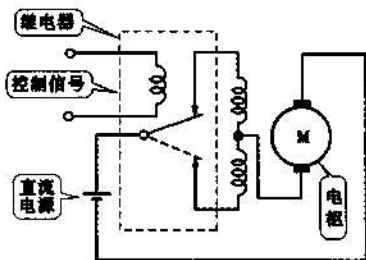
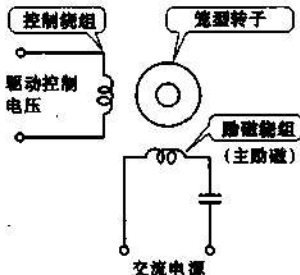


图 8.2 广泛用于多关节机器人



(a) 励磁极性可变的直流电动机



(b) 两相伺服电动机

图 8.3 直流串励电动机电枢控制方式

8.1.1 伺服电动机

自动控制系统及其它伺服装置中用的小型电动机。按照输入信号进行起动、停止、正转和反转等等过渡性动作,操作和驱动机械负荷。

8.1.2 直流伺服电动机

直流伺服电动机的原理和一般的直流电动机相同,作为伺服

电动机来考虑,有以下几点:

- (1) 与直径相比,电枢较长;
- (2) 为了减少不规则转矩的出现,电枢作成斜槽的;
- (3) 为了防止涡流,励磁铁芯和磁轭都是硅钢片叠压成的。

- (1) 直流伺服电动机
并励直流电动机
励磁极性可变的
直流电动机
 - (2) 交流伺服电动机
二相感应电动机
三相感应电动机
 - (3) 特殊伺服电动机
脉冲电动机
转矩电动机

8.1.3 交流伺服电动机

常用的两相伺服电动机和感应电动机原理相同。

图 8.4 伺服电动机的种类
(代表性的)

和直流伺服电动机一样,电枢细长,转子作成斜槽。频率为 50Hz, 60Hz, 400Hz, 功率多在 10W 以下。

8.1.4 用途

工业用机器人、机床、办公设备、各种测量仪器、计算机关联设备(打印机、绘图仪、磁带卷取装置)

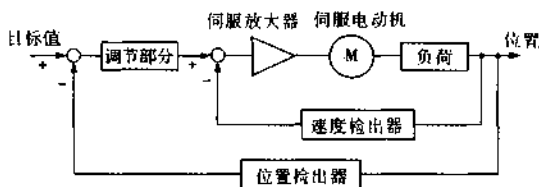


图 8.5 位置控制系统

8.2 微型电动机

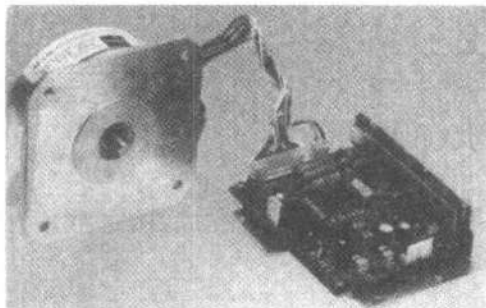
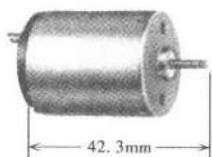


图 8.6 直流无刷电动机



电 压: 12V
转 速: 5200r/min
额定负荷: 20g · cm
额定电流: 160mA

图 8.7 直流小型功放电动机

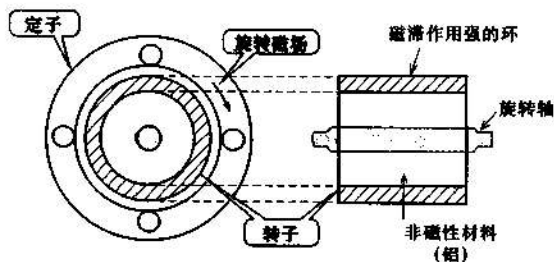


图 8.8 磁滞电动机的原理图

8.2.1 微型电动机

微型电动机是超小型电动机的总称。袖珍电动机或电唱机用的唱机电机输入功率在 3W 以下,最大尺寸在 50mm 以内。

近年来,随着工业技术的发展,要求各种设备小型轻量化,微型电动机用于这一目的的需求有日益增长的倾向。

8.2.2 微型电动机的种类

直流用 (1) 直流微型电动机

(2) 直流无刷电动机

交流用 (1) 单相罩极式感应电动机

(2) 电容运行电动机

(3) 单相磁滞电动机

8.2.3 直流微型电动机

原理与直流电动机相同,励磁磁极使用永久磁铁。电枢铁芯用波莫合金或纯铁片叠成,磁极数为2,使用电压多为1.5~4.0V。无刷电动机电压为直流,原理与同步电动机接近。

8.2.4 交流微型电动机

磁滞电动机是同步电动机的一种,定子旋转磁场使转子滞后磁化。转子就由旋转磁场牵着旋转。

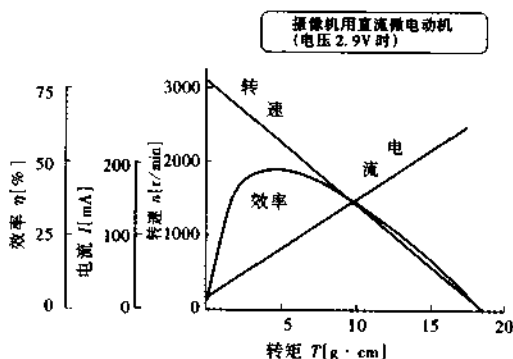


图 8.9 微型电动机的特性(例)

8.3 脉冲电动机(步进电动机)

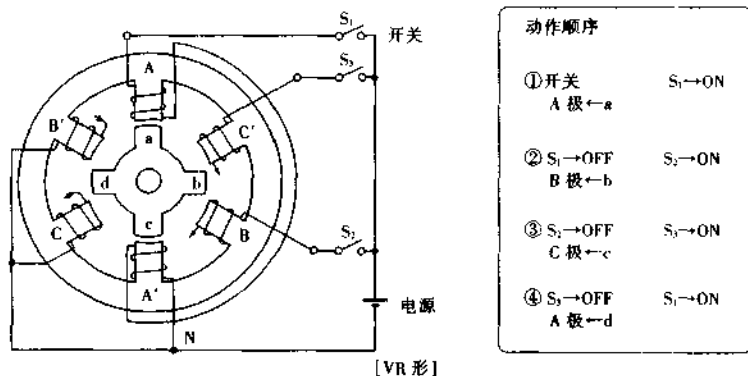


图 8.10 脉冲电动机原理图(磁阻式)

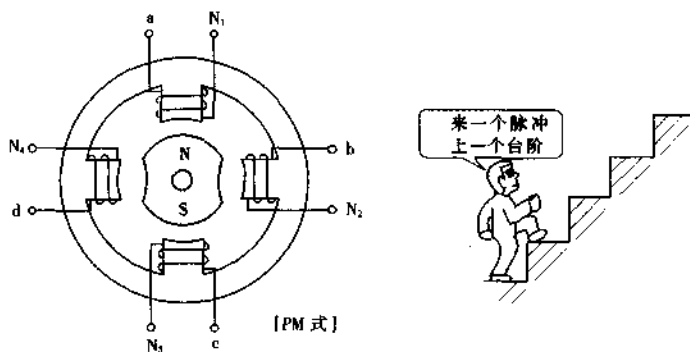


图 8.11 脉冲电动机原理图(永磁式)

8.3.1 脉冲电动机是由脉冲信号驱动的电动机

给这种特殊电动机的定子绕组施加直流电源，它产生的电磁力吸引转子并使其旋转。通过顺序切换输入电流的定子绕组，转子每次转一个角度。或根据正比于脉冲数的角度转动，或根据正比于脉冲频率的速度旋转。这也称为步进电动机。

8.3.2 脉冲电动机的种类

(1) 可变磁阻式 用电磁软钢等材料作成齿轮形的转子, 被定子绕组的电磁力吸引而旋转。[VR 式]

(2) 永磁式 转子使用永久磁铁, 定子绕组的电磁力吸引转子旋转。[PM 式]

(3) 复合式 VR 式和 PM 式复合。

8.3.3 脉冲电动机的驱动

为了顺序切换施于各相的电源, 需要有开关电路, 包括:

信号电路——脉冲振荡、停止, 频率变换, 反转信号发生。

逻辑电路——施于各相绕组的信号分配。

放大电路——将电流放大到电动机可以旋转。

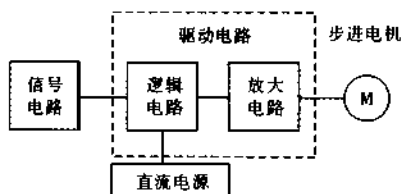


图 8.12 驱动电路的构成

8.3.4 用途

打印机进纸和托架移动, 软盘移动, 卡片机卡片移动, 磁带记录仪磁带移动, 复印机纸数控制, 绘画机的 X、Y 轴驱动, 机床的 X、Y 轴驱动等等。

8.4 直流电动机的控制电路

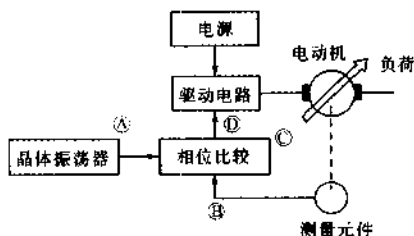


图 8.13 PLL 控制原理

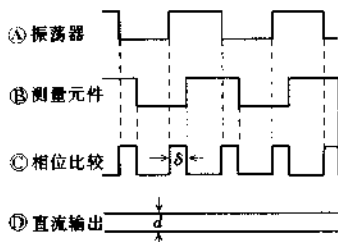


图 8.14 PLL 控制信号波形

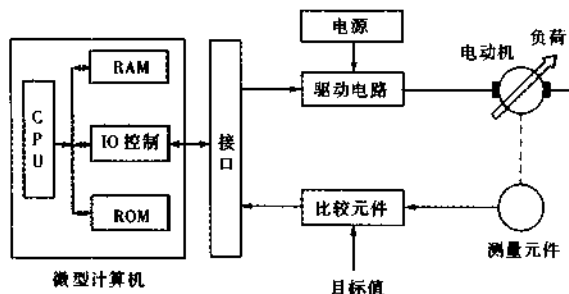


图 8.15 微机控制原理

8.4.1 直流电动机的转速容易随转矩改变

直流电动机具有根据负荷大小改变转速的性能。

直流电动机控制是将容易变化的转速保持为某一给定的目标值。为了使转速保持不变，就要检测转速，并与目标值比较，转速低时则提高电源电压使转速上升，以闭环的形式控制。

8.4.2 关于直流电动机的控制

(1) 位置控制和速度控制 在某一转数时使电机停止，例如用于自动聚焦照相机透镜止于某一适当位置的控制方法。

(2) PLL 控制 (phase locked loop) 这也叫锁相环路控

制。这是磁带记录仪和磁带录音机用的控制方法。

从晶体振荡器发出的脉冲和与电动机测量元件测出的转速所对应的脉冲,用相位器比较。将相位差值变换为直流电压输出。

用这一控制方法可进行极为精密的转速控制。

(3) 微机控制 微机是微计算机的略语。是超小型电子计算机,现在所有地方都用。空调机和机器人中等等的家电产品和 OA(办公自动化)设备中使用。

微机控制的优点是能进行更为复杂的控制。

CPU 是微计算机心脏的中央处理器,它进行演算控制。RAM 为随机存取存储器,ROM 为只读存储器,IO 控制为控制输入输出信号部分,接口为微机和外部各种装置间的缓冲交接部分。



图 8.16 4bit 微机

练 习 题

指出下列关于小型电动机叙述的错误:

- (a) 脉冲电动机是伺服电动机的一种。
- (b) 伺服电动机中用反馈控制。
- (c) 微型电动机是极小型电动机的总称。
- (d) 脉冲电动机就是步进电动机。
- (e) 脉冲电动机中的 PM 式是可变磁阻式。

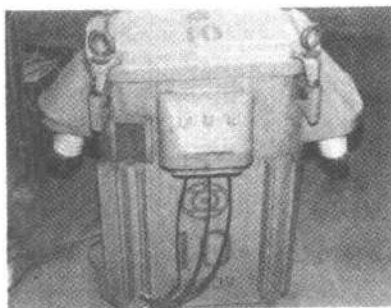
IX

变 压 器

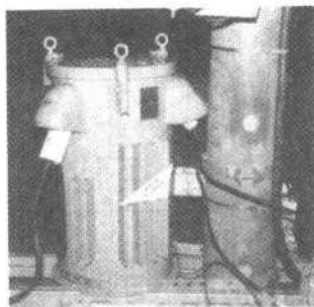
自从 1831 年法拉第(英)发现有划时代意义的电磁感应现象以来,利用互感改变电压的方法已有多人考虑过了。以后,1882 年,格拉(法)和吉布斯(英)曾考察了把一次绕组串联起来,数个二次绕组独立向各个电灯配电的变压器方案。明治初年(1868 年),进入日本的电灯最初用直流;1889 年才开始使用交流把灯点亮。以后,由于变压器装置简单,交流电压升压、降压都很容易,故得到了广泛的应用。

本章研究变压器原理、结构、等效电路、损耗与效率、并联运行,以及三相连接等等。

9.1 变压器的原理



(a) 输配电用变压器



(b) 柱上变压器

图 9.1 各种变压器

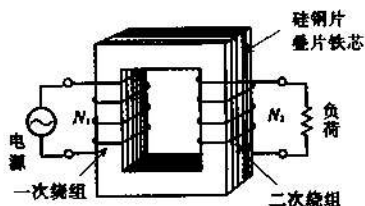


图 9.2 变压器的基本电路

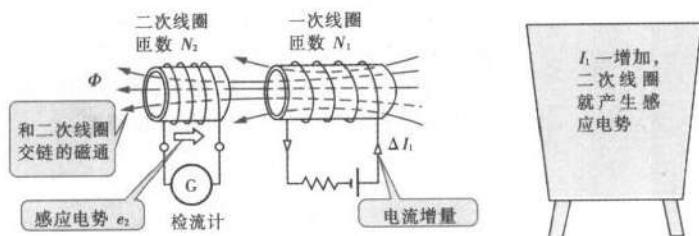


图 9.3 互感作用

9.1.1 变压器的作用

变压器按照用途不同, 种类很多, 可以说是照明、电子设备、

动力机械等的基础,作用很大(变压器实物参看图 9.1)。

9.1.2 变压器的原理

如图 9.2 所示,变压器是铁芯上绕有绕组(线圈)的电器,一般把接于电源的绕组称为一次绕组,接于负荷的绕组称为二次绕组。

图 9.4 中,给一次绕组施加直流电压时,仅当开关开闭瞬间,才使电灯亮一下。这因为仅当开关开闭时才引起一次绕组中电流变化,才使贯穿二次绕组的磁通发生变化,才会靠互感作用在二次绕组中感应出电势(参看图 9.3)。

该图(b)是一次绕组施加交流电压的情况,图(b)中交流电压大小和正负方向随时间而变化,故由此而生的磁通也随电压变化,这就在二次绕组不断感应出电势,使电灯一直亮。

这样,在变压器一次绕组施加的电源电压,可传向二次绕组。

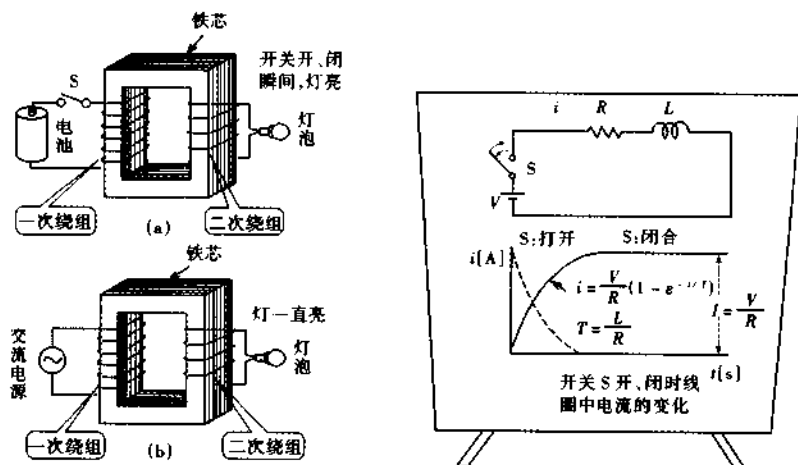


图 9.4 变压器的原理

9.1.3 根据匝数比变压

图 9.5 中,铁芯中磁通 $\phi[\text{Wb}]$ (和 i_1 同相),若在 $\Delta t[\text{s}]$ 时间

间隔内磁通变化 $\Delta\phi$ [Wb], 则根据与电磁感应有关的法拉第 - 楞次定律, 在一次和二次绕组 (匝数各为 N_1 和 N_2) 感应的 e_1 和 e_2 都有阻止磁通变化的方向, 如下式所示:

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

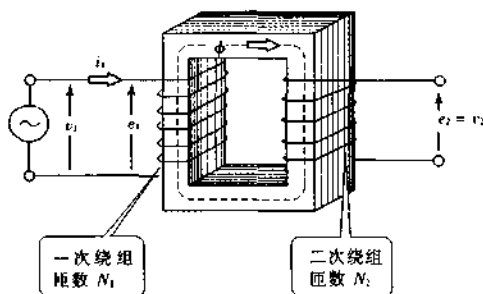


图 9.5 变压器的基本电路

加于一次绕组电的电压 v_1 和一次绕组感应电势 (一次感应电势) e_1 间的关系如下式所示:

$$v_1 = -e_1 = N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

出现于二次绕组的端电压 v_2 和二次绕组的感应电势 e_2 相同, 表示为

$$v_2 = e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

v_1 和 v_2 互相反相。

下面将 v_1 和 v_2 改用有效值 V_1 和 V_2 表示, V_1 与 V_2 之比如下式:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}}{N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

式中, a 等于一次侧匝数和二次侧匝数之比, 故称 a 为匝数比。

设变压器没有损耗, 认为二次侧输出的功率与一次侧输入的功率相等(参看图 9.6), 那么将有如下关系:

$$P_1 = P_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

式中 $\frac{V_1}{V_2}$ 称为变压比, $\frac{I_2}{I_1}$ 的倒数 $\frac{I_1}{I_2}$ 称为电流比。

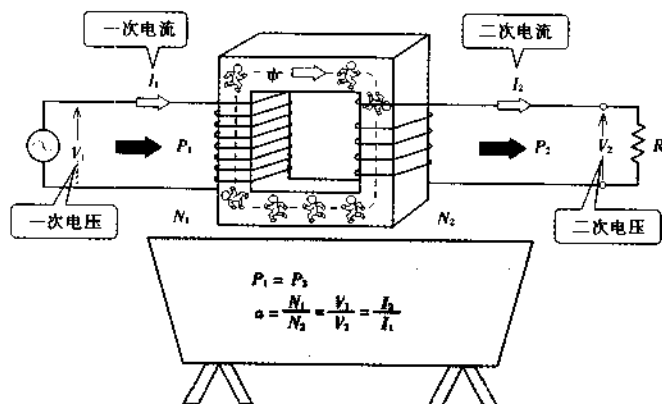


图 9.6 匝数比/变压比/电流比

9.2 变压器的结构

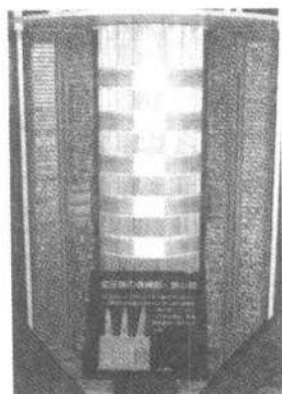


图 9.7 变压器的铁芯和绕组

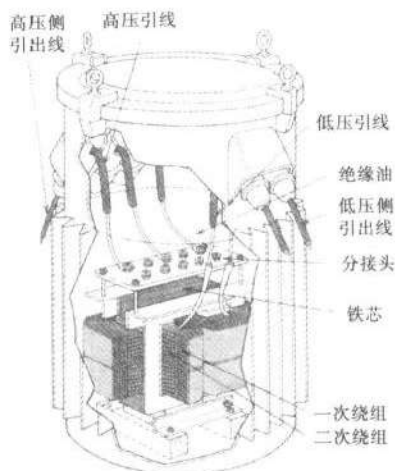


图 9.8 变压器剖面图

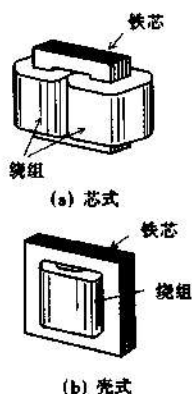


图 9.9 芯式和壳式

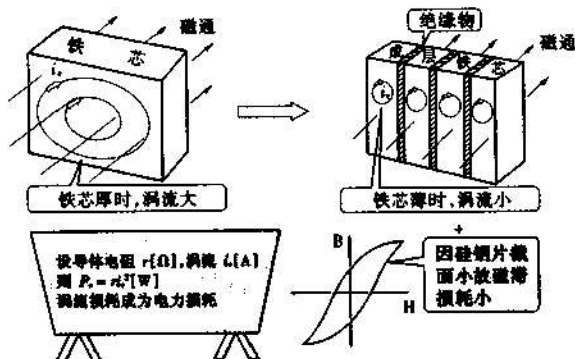


图 9.10 铁耗

9.2.1 按铁芯和绕组的配置分类

变压器基本上由铁芯和绕组组成,图 9.7 为铁芯部分和绕组部分,图 9.8 为使用绝缘油的变压器的剖面图。按变压器铁芯和绕组的配置来分类,可分为芯式和壳式两种。

图 9.9(a) 为芯式铁芯,结构特点是外侧露出绕组,而铁芯在内侧,从绕组绝缘考虑,这种安置合适,故适用于高电压。图(b)为壳式铁芯,在铁芯内侧安放绕组,从外侧看得见铁芯,这种适用于低电压大电流场合。

9.2.2 铁 芯

变压器铁芯通常使用饱和磁通密度高、磁导率大和铁耗(涡流损耗和磁滞损耗)少的材料(参看图 9.10)。

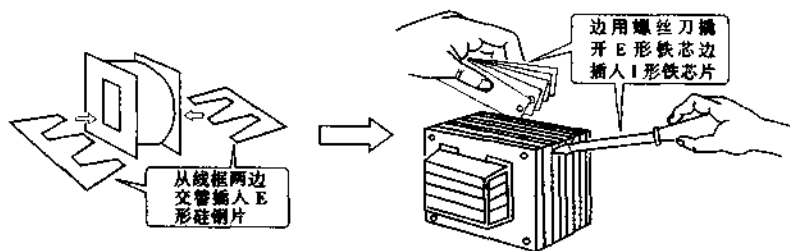


图 9.11 EI(壳式)铁芯的装配

硅含有率为 4% ~ 4.5% 的 S 级硅钢片是广为应用的材料。厚度为 0.35mm, 为了减少涡流损耗, 须一片一片地涂以绝缘漆, 将这种硅钢片叠起来就成为铁芯, 称此为叠片铁芯。图 9.11 示意硅钢片铁芯装配过程。

将硅钢片进行特殊加工, 使压延方向的磁导率大, 这样处理后的硅钢片称为取向性硅钢片。沿压延方向通过磁通时, 比普通硅钢片的铁耗小, 磁导率也大。用取向性硅钢带作成的变压器如图 9.12 所示的卷铁芯结构, 目的是使磁通和压延方向一致。卷铁芯先整体用合成树脂胶合, 再在两处切断, 放入绕组后, 再将铁芯对接装好。图 9.13 所示为切成两半装好的卷铁芯(又称对接铁芯)。

卷铁芯通常用于如柱上变压器那样的中型变压器中。

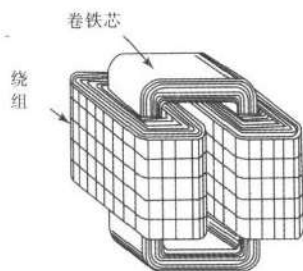


图 9.12 用取向性硅钢带作成的卷铁芯变压器

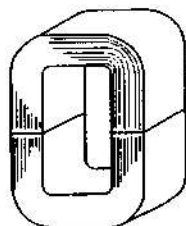


图 9.13 对接铁芯

9.2.3 绕 组

绕组的导线用软铜线、圆铜线和方铜线(参看图 9.14)。

图 9.15 为中型、大型变压器的绕组情况，有圆筒式和饼式绕法。一次绕组和二次绕组和铁芯之间的绝缘层用牛皮纸、云母纸或硅橡胶带等等。



(a) 绕组绕制方法



(b) 铜线线例

图 9.14 绕组绕制方法和铜线例

9.2.4 外箱和套管

油浸变压器的外箱由于要安放铁芯、绕组和绝缘物，故主要用软钢板焊接而成。

为了把电压引入变压器绕组，或从绕组引出电压，须将导线和外箱绝缘，为此要用瓷套管(参看图 9.16)。高电压套管常用充

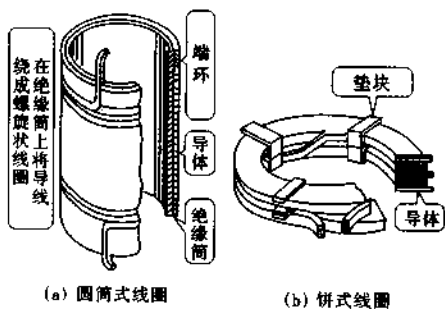


图 9.15 绕好的线圈

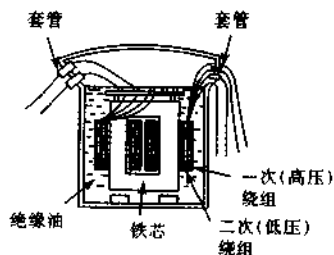


图 9.16 套管

油套管和电容型套管。

9.3

变压器的电压和电流

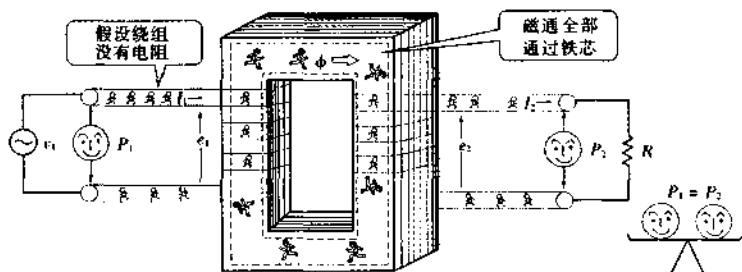


图 9.17 理想变压器

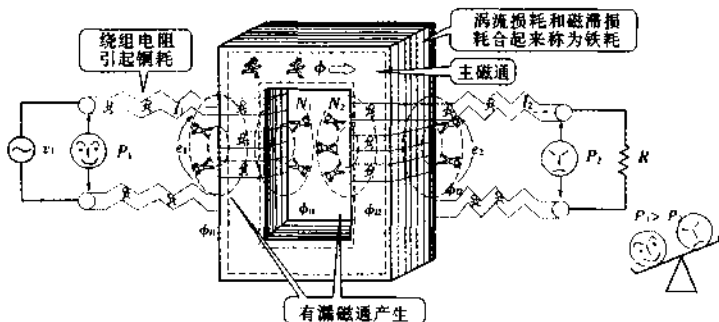


图 9.18 实际的变压器

9.3.1 理想变压器的电压、电流和磁通

如在前面变压器原理中所学过的那样，忽略了一次、二次绕组的电阻、漏磁通以及铁耗等等后，变压器就可称为理想变压器（参看图 9.17）。

图 9.19 中，一次绕组施加交流电压 v_1 [V]，二次绕组两端开放称为空载。图中一次绕组中有电流 i_0 流过，铁芯中就产生主磁通 ϕ ，因而把 i_0 称为励磁电流。若忽略绕组电阻，则它只有感抗，故 i_0 及 ϕ 的相位滞后电源电压相位 $\pi/2$ [rad]。另外， v_1 和一次、二次感应电势 e_1 、 e_2 的相位关系是： $v_1 = -e_1$ ，即为反相位，而 e_1 和

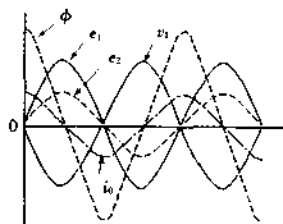
e_2 为同相位。以 e_1 为基准, 它们的关系如该图图(b)所示, 图(c)是向量图 ($\dot{V}_1, \dot{E}_1, \dot{E}_2, \dot{I}_0, \dot{\Phi}$ 为 v_1, e_1, e_2, i_0, ϕ 的向量)。

一次侧施加的交流电压频率为 $f[\text{Hz}]$, 铁芯中磁通最大值若以 $\phi_m[\text{Wb}]$ 表示, 则一次、二次感应电势 e_1, e_2 的有效值 E_1, E_2 将如下式所示:

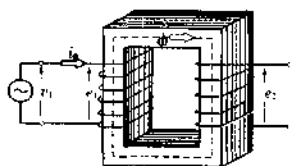
$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m [\text{V}]$$

$$E_2 = 4.44 f N_2 \phi_m [\text{V}]$$

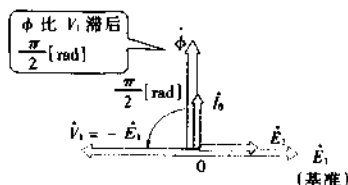
$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d(\phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega N_1 \phi_m \cos \omega t \\ &= \omega N_1 \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ \therefore E_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \phi_m \omega N_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \phi_m 2\pi f N_1 \\ &= 4.44 f N_1 \phi_m \end{aligned}$$



(b) 电压、电流和磁通的波形



(a) 电路



(c) 向量图

图 9.19 空载时的电路、波形和向量图

图 9.20 为二次绕组加上负荷, 即变压器负荷状态 (图中, v_1, e_1, i_1, i_0 用向量 $\dot{V}_1, \dot{E}_1, \dot{I}_1, \dot{I}_0$ 表示)。

图中二次绕组 N_2 中的负荷电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z}$$

由于 \dot{I}_2 的作用, 二次绕组产生新的磁势 $N_2 \dot{I}_2$, 它有抵消主磁通的作用。为了使主磁通不被抵消, 一次绕组将有新的电流流入, 使一次绕组产生磁势 $N_1 \dot{I}_1'$, $N_2 \dot{I}_2 + N_1 \dot{I}_1' = 0$ 称 \dot{I}_1' 为一次负荷电流。

这样, 有负载时一次全电流 \dot{I}_1 将为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_1' + \dot{I}_0$$

图 9.20(b) 用向量图表示了上述关系。

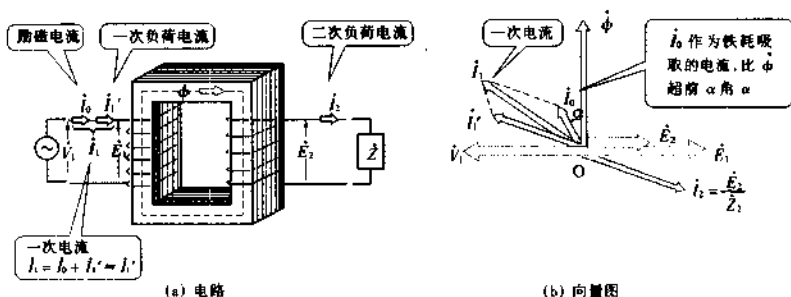


图 9.20 负荷时的电路、波形和向量图

一般说,二次负荷电流 \dot{I}_2 大时,励磁电流 \dot{I}_0 与 \dot{I}_1 相比小得很,只占百分之几,因此,可以认为一次电流 \dot{I}_1 和一次负荷电流 \dot{I}_1' 近似相等。

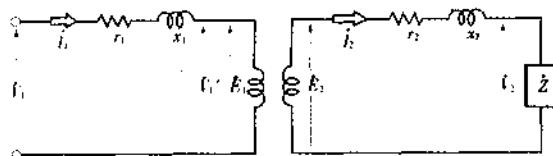
9.3.2 实际变压器有绕组电阻和漏磁通

实际变压器中,一次、二次绕组有电阻,铁芯中有铁耗。另外,一次绕组电流产生的磁通,并不都全部交链二次绕组,而产生漏磁通 ϕ_{l1} 和 ϕ_{l2} (参看图 9.18)。

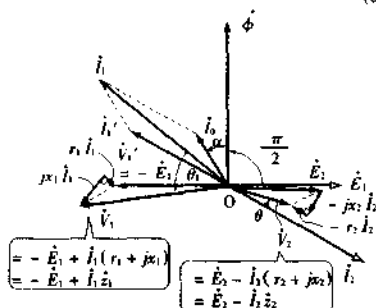
若实际变压器中,一次、二次绕组电阻为 r_1 、 r_2 ,则在 r_1 、 r_2 上的铜耗产生电压降。这里, ϕ_{l1} 只交链一次绕组,只在一次绕组中感应电势,只在一次绕组中产生电压降。同样, ϕ_{l2} 只在二次绕组产生电压降。

因此,实际变压器可用一次、二次绕组电阻 r_1 、 r_2 分别和一次漏电抗 x_1 、二次漏电抗 x_2 相串联的电路来表示,如图 9.21(a)所示,图中 \dot{V}_1' 称为励磁电压,且 $\dot{V}_1' = -\dot{E}_{10}$ 。

图 9.21(b)表示该电路的电压电流关系的向量图。



(a) 电路



(b) 向量图

1. \dot{V}_1 为 \dot{E}_1 的反相 $-\dot{E}_1$ 和 r_1 引起的电压降 $r_1\dot{I}_1$ 以及 x_1 引起的电压降 $jx_1\dot{I}_1$ 等向量相加的向量和;
2. \dot{V}_2 为从 \dot{E}_2 减去 r_2 引起的电压降 $r_2\dot{I}_2$ 和 x_2 引起的电压降 $jx_2\dot{I}_2$ 之后的向量;
3. θ_1 为一次输入功率的功率因数角, θ 为负载的功率因数角;
4. 一次功率 P_1 , $P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 [\text{W}]$;
5. 二次功率 P_2 , $P_2 = V_2 I_2 \cos \theta$
 $= V_1 I_1 \cos \theta_1 - I_1^2 r_1 - E_1 I_2 \sin \alpha - I_2^2 r_2 [\text{W}]$

图 9.21 实际变压器的电路和向量图

9.4 等效电路

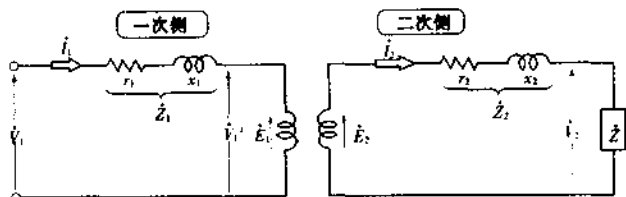


图 9.22 变压器电路

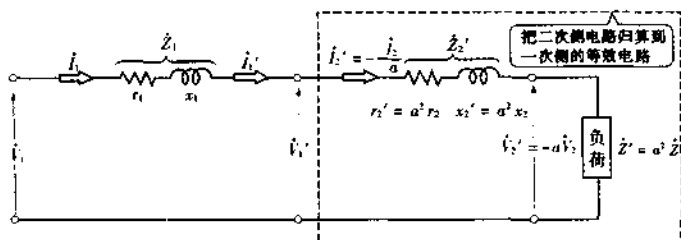


图 9.23 忽略励磁电流, 归算到一次侧的等效电路

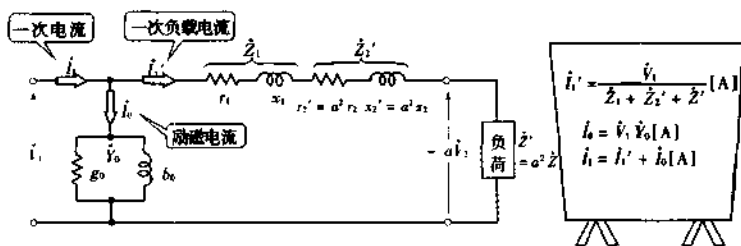


图 9.24 归算到一次侧的简化等效电路

9.4.1 利用变压器等效电路计算简单

所谓变压器等效电路,就是把变压器处理为无铁芯的电路。一次和二次电路不再是独立电路而是将一次电路的各电参数全归算到二次侧,或者将二次侧各参数归算到一次侧。

9.4.2 归算到一次侧的等效电路

变压器电路如图 9.22 所示, 绕线电阻和漏电抗用符号法表示如下(参看图 9.25):

$$\dot{Z}_1 = r_1 + jx_1 [\Omega]$$

$$\dot{Z}_2 = r_2 + jx_2 [\Omega]$$

式中, \dot{Z}_1 为一次阻抗, \dot{Z}_2 为二次阻抗。

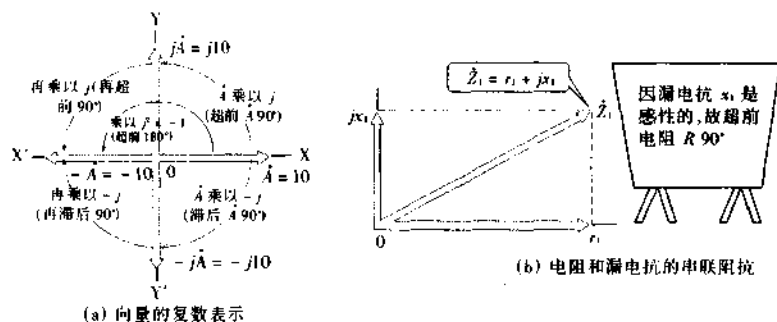


图 9.25 向量和复数表示

变压器二次侧接上负荷时, 二次电流 \dot{I}_2 由下式计算:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z} + \dot{Z}_2} [\text{A}]$$

一次负荷电流 \dot{I}_1' 与 \dot{I}_2 之间有 $N_1 \dot{I}_1' + N_2 \dot{I}_2 = 0$ 的关系, 设匝数比为 a , 可得下式:

$$\dot{I}_1' = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{a} [\text{A}]$$

将 \dot{I}_2 代入上式, 得

$$\dot{I}_1' = -\frac{\dot{E}_2}{a(\dot{Z} + \dot{Z}_2)} [\text{A}]$$

$$\text{又因为 } \dot{E}_1 = -\dot{V}_1', \quad \dot{E}_2 = \frac{\dot{E}_1}{a}$$

$$\text{故 } \dot{I}_1' = \frac{\dot{V}_1'}{a^2(\dot{Z} + \dot{Z}_2)} [\text{A}]$$

由上看出, 把二次侧负荷阻抗 Z 和二次阻抗 Z_2 各乘 a^2 倍后就可以接入一次电路中。这样, 把二次绕组电阻 r_2 和漏电抗 x_2 乘 a^2 倍后就归算到一次侧。

还有, 归算到一次侧的二次感应电势为 $-aE_2$, 归算到一次侧的二次电流 I_2' 为 $-I_2/a$ 。

图 9.23 表示忽略励磁电流归算到一次侧的变压器等效电路。

9.4.3 考虑励磁电流的简易等效电路

励磁电流 I_0 中一部分是作为铁耗而消费的电流, 称为铁耗电流 I_{0w} , 还有一部分是产生主磁通的电流, 称为磁化电流 I_{0r} , I_0 为两者向量和。

图 9.26 表示励磁电流的电路, 它并联接在一次绕组的励磁电压 V_1' 上, 铁耗电流支路用励磁电导 g_0 。磁化电流支路用励磁电纳 b_0 , 而励磁电流 I_0 电路用励磁导纳 Y_0 表示。

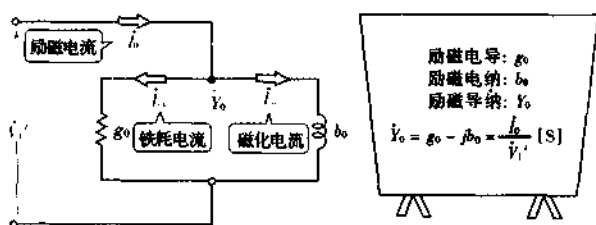


图 9.26 励磁电流电路

实际变压器中, 一次阻抗电压降与电源电压 V_1 相比很小, 励磁电流 I_0 与 I_1 相比也极小, 故励磁导纳 Y_0 电路可接于电源侧, 如图 9.24 所示。计算这种电路比把 Y_0 接于 V_1' 时简单, 称这种电路为归算到一次侧的简化等效电路。

9.4.4 归算到二次侧的等效电路

既可以把二次侧归算到一次侧, 也可以相反, 把一次侧归算到

二次侧来画出等效电路。图 9.27 是这种简化等效电路。

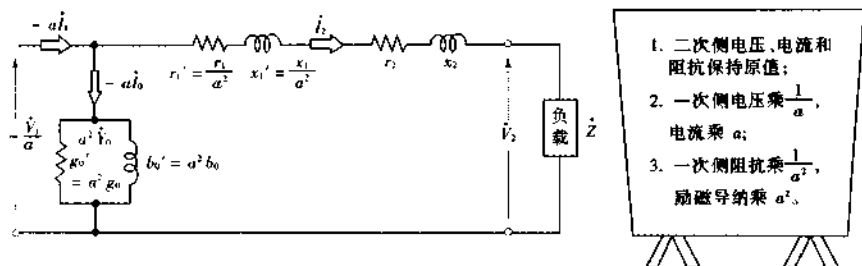


图 9.27 归算到二次侧的等效电路

9.5 规格和损耗

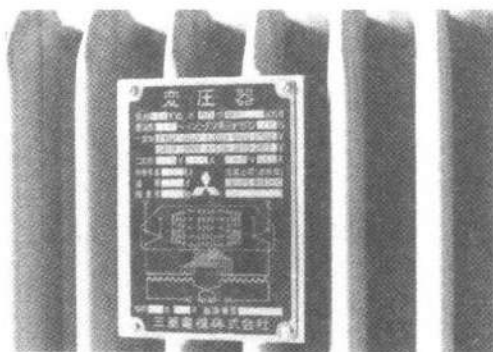


图 9.28 变压器的标牌

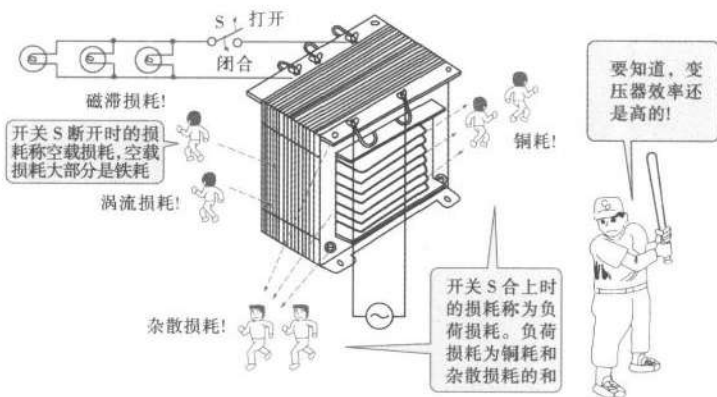


图 9.29 变压器的损耗

9.5.1 使用变压器时要注意规格

变压器有使用上的限度，即额定值。额定值包括功率、电压、电流、频率和功率因数等，这些都表示在附于变压器箱体上的标牌中(参看图 9.28)。

额定容量(也称额定输出功率)，是指在标牌中的额定频率及

额定功率因数一般为 100% 情况下, 二次侧输出端得到的视在功率, 即

额定容量 = (额定二次电压) × (额定二次电流)

单位用伏安[VA]、千伏安[kVA]或兆伏安[MVA]。

9.5.2 铜耗、磁滞损耗和涡流损耗

变压器无旋转部分, 因此无摩擦等机械损耗, 但有铁芯产生的铁耗, 还有电流流过一次二次绕组而产生的铜耗 (参看图 9.29)。根据变压器是否带有负荷, 这些损耗可分为空载损耗和负荷损耗。

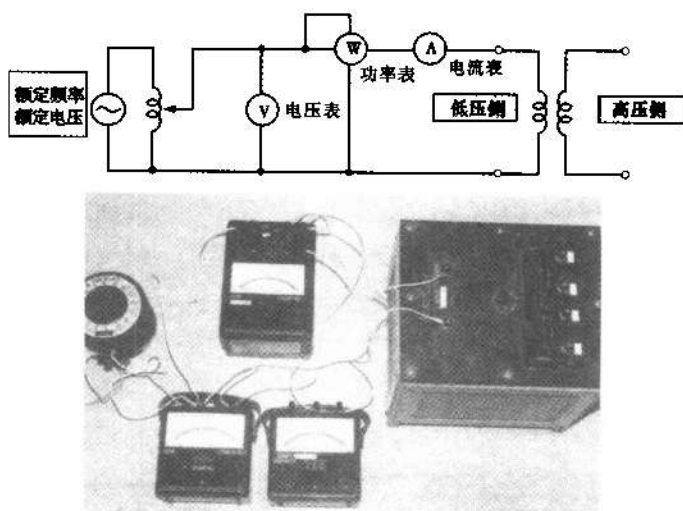


图 9.30 空载损耗的测量电路

(1) 空载损耗 在低压侧施加额定电压, 高压侧不接负荷, 处于开路状态, 从低压侧电路供给的功率全部成为变压器的损耗。这种损耗称为空载损耗。图 9.30 是空载损耗测量电路, 低压侧施加额定频率的正弦波额定电压; 电流表读数为空载电流; 功率表读数为空载损耗。

空载损耗大部分是铁耗, 铁耗为磁滞损耗和涡流损耗之和。

这两种损耗可用下式求得:

$$\text{磁滞损耗 } p_h = k_h f B_m^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (1)$$

$$\text{涡流损耗 } p_e = k_e (t k_f f B_m)^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (2)$$

式中 k_h , k_e 为取决于材料的常数, t 为钢片厚度, f 为频率, B_m 为最大磁通密度, k_f 为波形因数(正弦波时为 1.11)。

由式(2)可知,由于涡流损耗 p_e 与钢片厚度 t 的平方成正比,故铁芯用薄钢片叠成为好。还有,在同一电压下磁滞损耗与频率成反比,而涡流损耗与频率无关系(由 $V_1 = 4.44 f N_1 \phi_m = 4 k_f f N_1 A B_m$, 能解出 B_m , 代入式(1),(2))。

因此,60Hz 用的变压器若用于 50Hz,铁损耗将增至 1.2 倍。所以说一般 60Hz 用的变压器不能用于 50Hz,但 50Hz 用的电力变压器却可用于 60Hz。

(2) 负荷损耗 由负荷电流在变压器中产生的损耗,称为负荷损耗。

图 9.31 是测量负荷损耗的电路。该电路中低压侧短路,使低压侧有额定频率的额定电流,功率表读数即为负荷损耗。因为绕组电阻随温度而变化,所以必须把实测值修正为电气设备试验用的基准温度 75℃ 的值,这种将低压短路进行的试验称为短路试验。

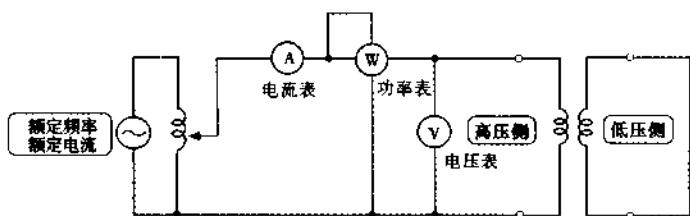


图 9.31 负荷损耗的测量电路

负荷损耗是由于负荷电流在一次、二次绕组产生的铜损耗和杂散损耗之和。这里所说的杂散损耗是指:负荷电流在变压器中产生漏磁通,引起外箱和固紧螺钉等金属部分有涡流,从而产生损耗。而杂散损耗与铜损之比,一般小型变压器极小,但大型变压器

确是一个不能忽略的值。

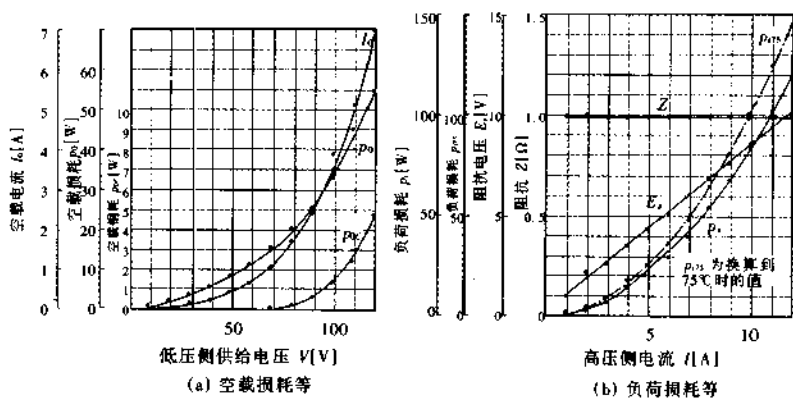


图 9.32 空载损耗和负荷损耗的测量值(例)

9.6 效率和电压调整率

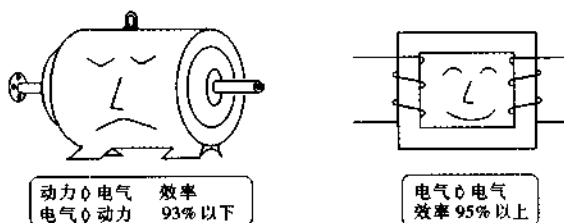


图 9.33 变压器的效率高

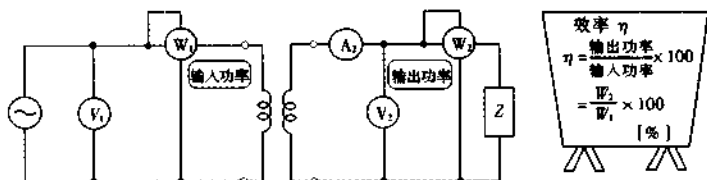


图 9.34 实测效率的测量电路

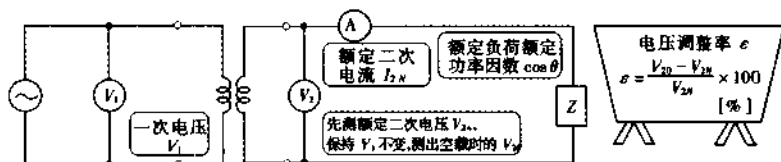


图 9.35 电压调整率的测量电路

9.6.1 变压器的效率

发电机把机械能变换为电能，电动机进行相反的变换。然而变压器是电能自己的变换，因此，结构简单，损耗小，效率在 95% 以上，非常高（参看图 9.33）。变压器效率的表示方法有以下几种：

(1) **实测效率** 只说效率二字，是指实测效率。给图 9.34 实测电路接上负荷，测出二次和一次功率，然后算出二者之比就可以了。最大效率理论上是铁耗和铜耗相等的时候，实际变压器从 1/2 负荷到额定负荷都几乎接近最大效率值。

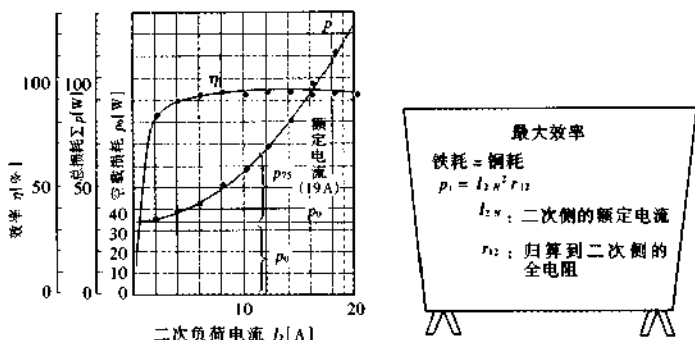


图 9.36 效率实测例

(2) 规约效率 变压器容量大时, 实测效率的测量准备工作很难。于是, 进行空载试验和短路试验求出损耗, 然后, 用损耗和输入功率或输出功率表示效率, 这称为规约效率, 如下式:

$$\begin{aligned}\text{规约效率 } \eta &= \frac{\text{输出功率 [kW]}}{\text{输出功率 [kW] + 损耗 [kW]}} \times 100 [\%] \\ &= \frac{\text{输入功率 [kW] - 损耗 [kW]}}{\text{输入功率 [kW]}} \times 100 [\%]\end{aligned}$$

这里若令变压器容量为 W [kVA], 铁耗为 p_i [kW]。额定负载铜耗为 p_c [kW], 负载功率因数为 $\cos \theta$, 则额定负载时效率为

$$\text{额定负载效率 } \eta = \frac{W \cos \theta}{W \cos \theta + p_i + p_c} \times 100 [\%]$$

(3) 全日效率 柱上变压器等, 一天中很少是带不变的负荷, 因此需要计算一天总计效率。

$$\text{全日效率 } \eta_d = \frac{\text{日输出电量}}{\text{日输入电量}} \times 100 [\%]$$

由于空载损耗大, 故全日效率较实测效率低。配电用柱上变压器的全日效率在 3/5 负荷附近有最大的效率。

9.6.2 电压调整率

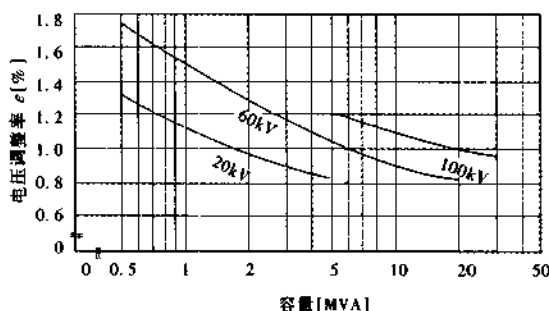
日常使用的电力负荷一般是恒压方式的, 故电压若变化, 对

负荷就会有影响。例如 100V 的白炽灯,电压降至 90V 时,光束约降至 70%,变暗。例如电风扇和洗衣机等设备的电容运行电动机,由于转矩与电压的平方成正比而变小,故电压下降时转矩减小更快。

变压器二次侧端电压随着负荷增减而变化,变化的值越小越好。电压变化的比率称为电压调整率。图 9.35 是电压调整率的测量电路。首先在额定频率、额定功率因数和额定二次电流条件下,调节一次电压 V_1 使二次电压保持为额定电压 V_{2N} 。然后,保持此 V_1 不变,把二次负荷去掉,变成空载,二次端电压变为 V_{20} ,电压调整率如下式所示:

$$\text{电压调整率 } \varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2N}}{V_{2N}} \times 100 [\%]$$

电压调整率约为 1.5% ~ 5%,容量越大,电压调整率越小。图 9.37 为表示容量和电压调整率关系之一例。



由计算求电压调整率的方法

$$\varepsilon = P \cos \theta + Q \sin \theta [\%]$$

这里 $P = \frac{r_{21} I_{2N}}{V_{2N}} \times 100 [\%]$

$$Q = \frac{x_{21} I_{2N}}{V_{2N}} \times 100 [\%]$$

r_{21}, x_{21} 为算到二次侧的电阻和漏电抗,
 I_{2N} 为额定二次电流,
 V_{2N} 为额定二次电压

图 9.37 电压调整率之一例

9.7 变压器温升和冷却

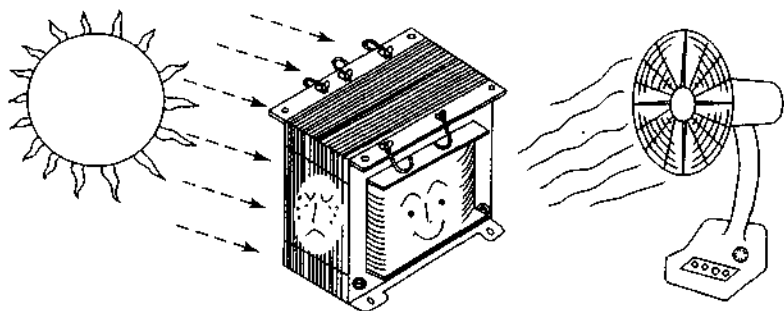


图 9.38 温升和冷却

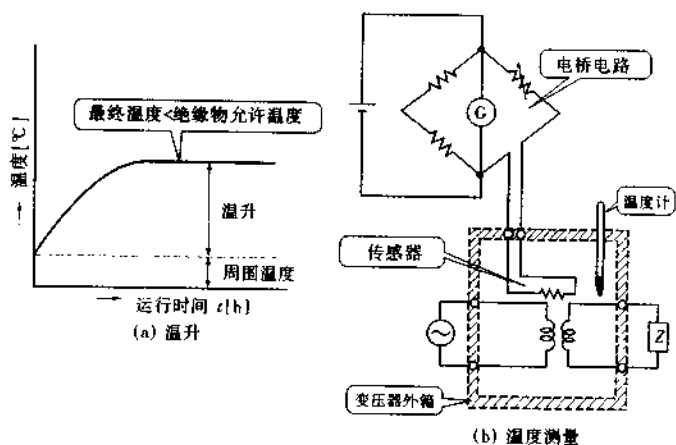


图 9.39 温升和温度测量

9.7.1 温升和温度测量

变压器运行中铁芯中的铁耗,绕组中的铜耗,都变为热而使变压器温度上升,如图 9.39(a)所示。变压器温度升高时,用于其中的绝缘物就会变质劣化,绝缘抗电强度、粘度、燃点都下降,因此变压器温度应不超过绝缘物的允许温度。

变压器温度测量是包括用电阻法测量绕组温度和用温度计法测量油和铁芯温度。

用电阻法测量绕组测试是用下式求得

$$\text{绕组温度 } t_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + t_1) + t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}]$$

式中 t_1 : 试验开始时变压器绕组的温度[$^\circ\text{C}$];

R_1 : t_1 时变压器绕组的电阻[Ω];

R_2 : 温度 t_2 时同一绕组的电阻[Ω].

图(b)所示为使用水银温度计或酒精温度计等温度计测量的场合。

还有,在大型变压器中用传感器来测量,它用电桥测量铜线的电阻值,如同图所示,由铜线电阻值可知温度。

用上述方式测量的温度上限应在表 9.1 所列值以下。

表 9.1 温升上限(根据 JISC4304)

变压器部位		温度测量方法	温升上限
绕 组		电阻法	55
油	本体内的油直接与大气接触	温度计法	50
	本体内的油不直接与大气接触		55

9.7.2 冷却方法

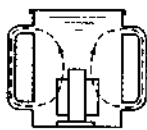
为了使变压器长时间安全运行,必须把各部位温度降到规定限度以下。表 9.2 列出了变压器冷却方法和用途(参看图 9.40)。

表 9.2 变压器的冷却方法和用途

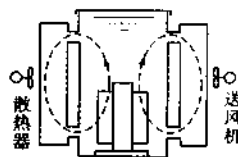
分 类		冷却方法	用 途	
干 式	自冷式	靠和周围空气自然对流和辐射把热散发出去	小容量变压器测量用互感器	
	风冷式	用送风机强制周围空气循环	中型电力变压器 H 类绝缘变压器	
油 浸 式	自冷式	靠和周围空气自然对流和辐射把热散发出去	小型配电用柱上变压器	图(a),(b)
	风冷式	用送风机强制周围空气循环	中型以上电力变压器	图(c)
	水冷式	箱体内装有冷却水管, 靠冷却水循环把油冷却	同上	图(d)
	强制油循环风冷式	箱体外装有冷却管, 用泵把箱内的油打到箱外冷却管, 形成强制油循环, 箱外冷却管用送风机冷却。	同上	图(e)
	强制油循环水冷式	箱体外装有冷却管, 用泵把箱内的油打到箱外冷却管, 形成强制油循环, 箱外冷却管用冷却水冷却。	同上	图(f)
充气式		使用化学稳定的碳氟化合物做冷却剂利用液体的气化热来冷却	同上	



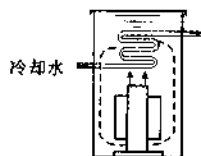
(a) 油浸自冷式



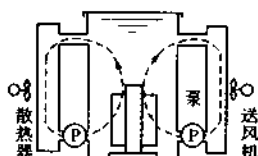
(b) 油浸自冷式



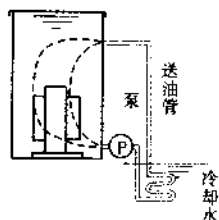
(c) 油浸风冷式



(d) 油浸水冷式



(e) 强制油循环风冷式



(f) 强制油循环水冷式

图 9.40 各种冷却方式

9.7.3 变压器油和油劣化的防止

变压器一般使用品质良好的矿物油,为了防止火灾,也可用不燃性合成绝缘油。变压器油除了把变压器本体浸没,使绕组绝缘变好以外,同时还有冷却作用防止温度上升。

变压器油须具备以下的条件:

- (1) 为了能起绝缘作用,耐电强度应高;
- (2) 为了发挥对流冷却作用,油热膨胀系数要大,粘度应小,为了增加散热量,比热应大,凝固点要低;
- (3) 化学稳定,高温下也无化学反应。

油浸变压器中油的温度随负荷变化而升降,油不断进行膨胀和收缩,这使得变压器内的空气反复进出。因此,大气中的湿气会进入油中,不仅会引起耐电强度降低,而且和油面接触的空气中的氧气会使油氧化,从而形成泥状沉淀物。

为了防止上述油劣化,采用了图 9.41 所示的储油箱(俗称油枕。——译者注),油膨胀和收缩引起的油面上下变化,只在储油箱内进行,油的污染变少,沉淀物可以排出清除。为了除去大气中的湿气,在储油箱上装有玻璃制的吸湿呼吸器,其内放入活性铝矾土吸湿剂。

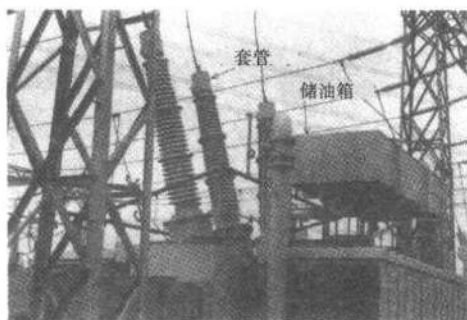


图 9.41 储油箱

9.8 极性和并联运行

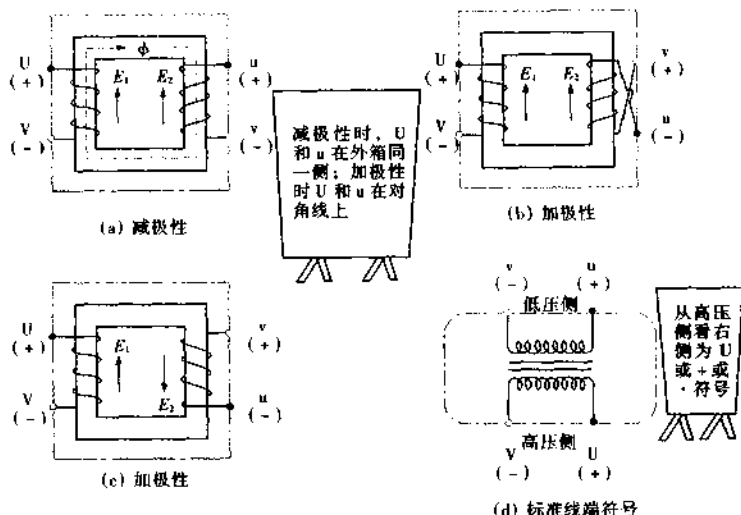


图 9.42 极性和输出端符号

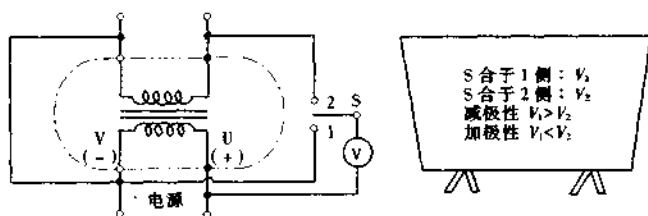


图 9.43 极性试验

9.8.1 极性和输出端符号

电池串并联接线时, 须知 (+)、(-) 极性, 变压器有若干台相接时, 也须了解其极性。变压器的极性由绕组感应电势而定。图 9.42(a) 中, 在一次绕组进线端 $U(+)$ 、 $V(-)$ 施直流电压瞬间, 二次绕组出线端的极性为 $u(+)$ 、 $v(-)$ 。这样, 若一次、二次进出线端为同一极性时, 称为减极性接法。如果绕组绕向相同, 但引出线

引出之前两端对调一下,如图(b)所示;或者如图(c)所示,改变二次绕组绕向,都使一次、二次对应的出线端的极性不同。这时称为加极性接法。日本以减极性为标准。

变压器箱体上出线端标有符号。如图(d)所示,高压侧符号为U另加(+)或 \bullet ,V另加(-);低压侧为u,另加(+)或 \bullet ,v另加(-)。从高压端看过去,右侧的符号为U。

变压器极性试验时,按图9.43接线,将绕组、电压表、开关S连起来。然后将开关S合于1侧,测出此时的 V_1 ,再将S合于2侧,测出 V_2 。若 $V_1 > V_2$,则为减极性,而当 $V_1 < V_2$ 时为加极性。

9.8.2 并联运行

变压器除了单台使用外,还使用两台以上的变压器,有时是由于负荷增大需增加变压器容量,有时是为了达到经济运行目的,为此,一次侧和二次侧各都按并联接线。称此为变压器并联运行(参看图9.44)。

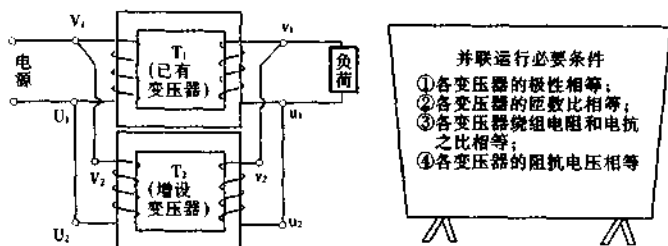


图 9.44 单相变压器的并联运行

9.9 三相连接法

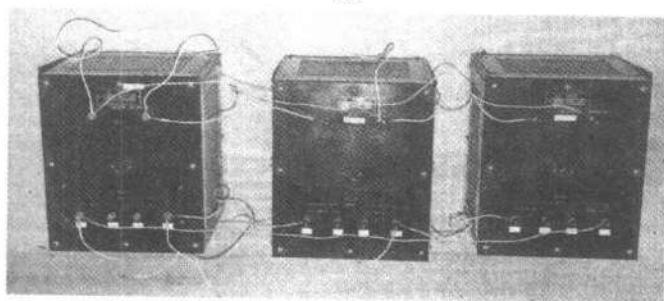
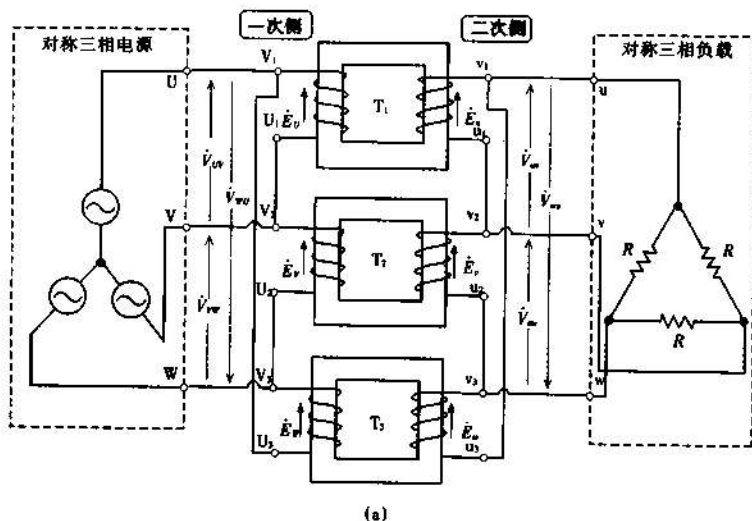


图 9.45 三台单相变压器组成的三相连接(Δ - Δ 连接)

9.9.1 三台单相变压器的三相连接

可用一台三相变压器对三相电源进行变压,但也可用三台单相变压器按一定接线方法组成三相。用后一种方法时,三台单相变压器同时故障的可能几乎没有,只需备用一台即可。

三台单相变压器的三相连接方法如下:

Δ - Δ 连接(三角三角连接,或读 delta-delta 连接)

Δ -Y 连接(三角星形连接,或读 delta-star 连接)

Y- Δ 连接(星形三角连接,或读 star-delta 连接)

Y-Y 连接(星形星形连接,或读 star-star 连接)

如上组合的三台单相变压器称为变压器组。各台变压器应具备以下条件:

- ① 容量、电压和频率的额定值相同
- ② 绕组电阻和电抗相等。

9.9.2 Δ - Δ 连接

图 9.45 中三台单相变压器的一次侧和二次侧接成三角连接,各变压器一次侧施加电压 \dot{V}_{UV} , \dot{V}_{VW} , \dot{V}_{WU} (我国标准用 A、B、C 表示三相。——译者注),二次侧连接相同,带有对称三相负荷。图 9.46 是图 9.45 的等效电路,清楚表明变压器一次侧和二次侧都为 Δ - Δ 连接。

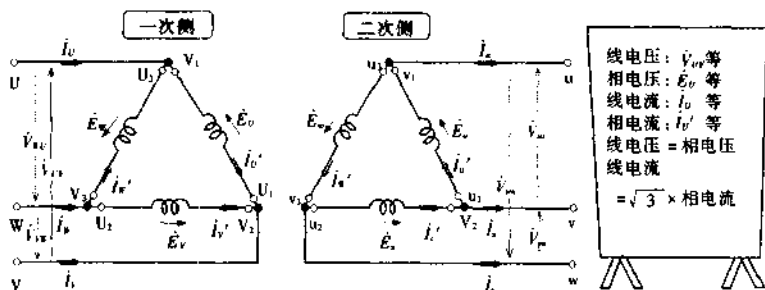


图 9.46 Δ - Δ 连接

Δ - Δ 连接时,线电流是各单相变压器额定电流的 $\sqrt{3}$ 倍,可带负荷功率是一台额定容量的 3 倍。这种连接可用于 70kV 以下电流大而电压较低的配电变压器。缺点是中心点不能接地。

9.9.3 Δ -Y 连接

三台单相变压器的一次侧仍按 Δ 连接,二次侧按图 9.47(a)

连接。图(b)是其等效电路,称为 Δ -Y连接。

Δ -Y连接时,变压器一次侧相电压和线电压相等,二次侧的线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。因此,这种连接法适用于从低电压向高电压变压的场合,输电线的送端发电厂多用这种连接法。

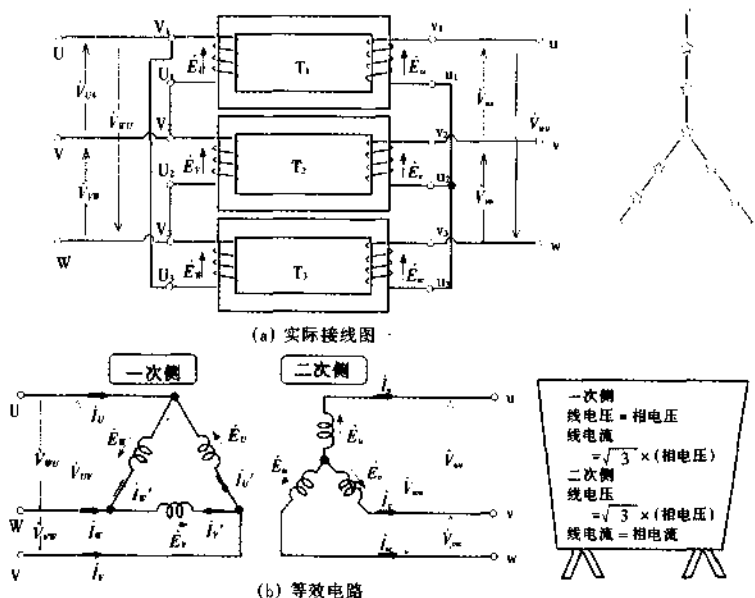


图 9.47 Δ -Y 连接

9.9.4 Y- Δ 连接

图 9.48 示出的三台单相变压器一次侧接成星形,二次侧接

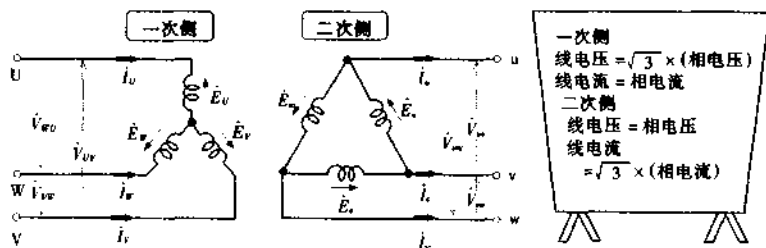


图 9.48 Y- Δ 连接

成三角形,这种接线称为 Y- Δ 连接。

Y- Δ 连接时,一次侧相电压为线电压的 $\sqrt{3}$ 倍,二次侧相电压和线电压相等,为一次侧相电压的 $1/a$ 。因此,输电线的受电端一次变电站从高压变到低电压的场合是用这种连接法。

9.9.5 Y-Y 连接

3 台单相变压器一次侧和二次侧都接成星形的连接,称为 Y-Y 连接。如图 9.49 所示。

Y-Y 连接时,因各变压器的励磁电流中含有 3 次谐波,故电压波形畸变,对通信线路有电磁干扰,因此,除特殊情况之外,一般不用这种连接法。

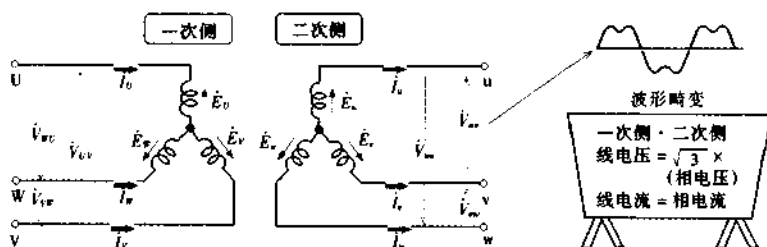
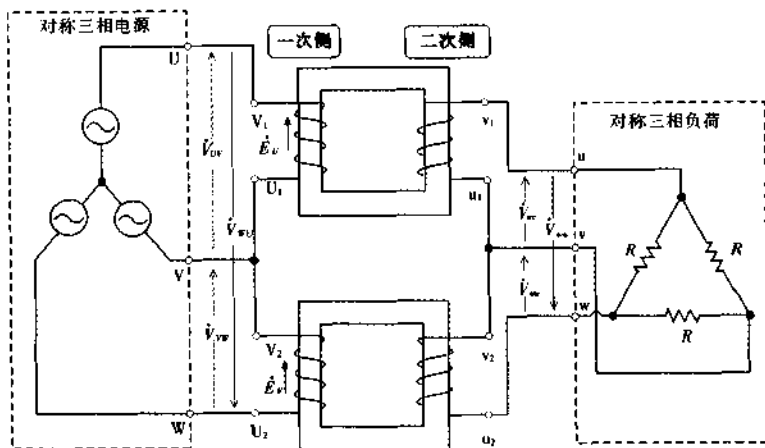
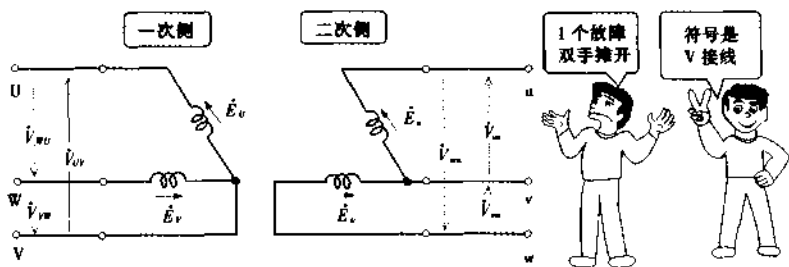


图 9.49 Y-Y 连接

9.10 V 连接法



(a) 实际接线图



(b) 等效电路

图 9.50 V-V 连接

9.10.1 V-V 连接

三相电源经变压器向三相负荷供电，除用三台单相变压器外，还有用 2 台变压器的方法。

图 9.50 所示的 2 台变压器，一次侧和二次侧都为 V 连接的

情况, V-V 连接也可简称 V 连接。V-V 连接相当于从三台变压器组成的 Δ - Δ 连接中拿开一台后形成的连接法。 Δ - Δ 连接的变压器组在运行中有一台发生故障, 或者预计负荷将来准备增设等场合, 可用 V-V 连接。图(b)是图(a)实际接线图的等效电路。

9.10.2 为何两台单相变压器可得对称三相电压

根据图 9.50(b), 可得如图 9.51 所示的线电压和相电压的关系。由该图知, 二次侧电压也是对称的。

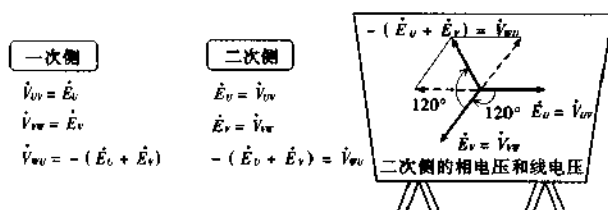


图 9.51 线电压和相电压的关系

图 9.52 示出的二次侧接上负荷时电压和电流的关系。因二次侧线电流只能通过变压器额定二次电流, 故负荷的功率是 1 台变压器额定输出功率的 $\sqrt{3}$ 倍, 因此, 2 台变压器的利用率为 86.6%。

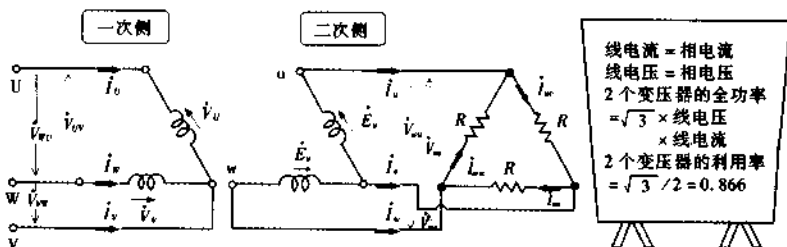


图 9.52 V-V 连接的电压和电流

练 习 题

1. 变压器一次电压 3150V, 二次电压 105V, 求以下各值:
 - (a) 一次侧施加 3300V 时, 二次侧电压;
 - (b) 二次侧电压 100V 时, 一次侧电压;
 - (c) 二次绕组匝数为 80 匝时, 一次绕组匝数。
2. 在匝数比为 30 的变压器的一次侧施加 6600V, 求以下各值:
 - (a) 二次电压;
 - (b) 二次侧接有 50kW、功率因数 80% 的负荷时的二次电流 I_2 和一次电流 I_1 ;
 - (c) 一次输入功率 P_1 [kVA]。
3. 有一台铁芯有效截面积为 $5 \times 10^{-3} \text{m}^2$, 最大磁通密度为 0.8T 的单相变压器。求一次绕组为 3000 匝, 二次绕组为 150 匝时的感应电势 E_1 和 E_2 , 计算时额定频率取为 60Hz。
4. 有一台容量为 30kVA, 3300/110V 的变压器, 空载时的一次电流为 0.5A, 铁耗为 990W, 求铁耗电流 I_{0w} 和磁化电流 I_{0i} 。
5. 3 台 7.5KVA, 3000/100V 的单相变压器接成 Δ - Δ 连接, 负荷为三相平衡负荷 15kVA, 求一次、二次线电流 I_U, I_L 及变压器绕组中的电流 I_U', I_L' 。计算中忽略绕组电阻、漏电抗以及励磁电流。
6. 2 台额定功率为 40kVA 的单相变压器接成 V 连接时, 最大输出功率多大 [kVA]?
7. 匝数比为 85 的变压器, 若一次侧电流为 6A, 归算到二次侧时为多少?
8. 变压器一次电压为 2000V, 二次电压为 200V, 绕组电阻 $r_1 = 10\Omega$, $r_2 = 0.08\Omega$, 漏电抗 $x_1 = 8\Omega$, $x_2 = 0.06\Omega$, 试将电阻电抗归算到一次侧和二次侧。
9. 求输出功率 150kW, 空载损耗 800W、铜耗 700W 和杂散损耗 300W 的变压器的效率。
10. 有一台 30kVA 柱上配电变压器, 铁耗为 200W, 额定负荷时的铜耗 400W, 求负荷功率因数为 80% 时的效率。

X

各种变压器

关于变压器，不仅有从发电厂到家庭的输配电所用的大容量电力变压器，还有收音机、电视机、计算机等各种电子设备、测量仪器、机器人等机电一体化自动装置中使用的小容量变压器，这其中包括根据负荷种类和目的而制作的特殊结构的变压器。

本章介绍发电厂等部门常用的用一台变压器变换三相电压电流的三相变压器，可调整输出电压的自耦变压器，以及测量输电系统中高电压、大电流用的互感器等。

10.1 三相变压器

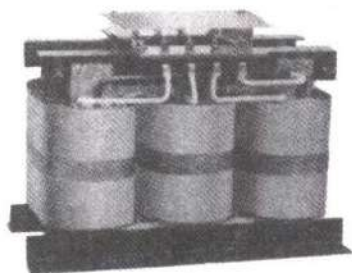


图 10.1 三相变压器

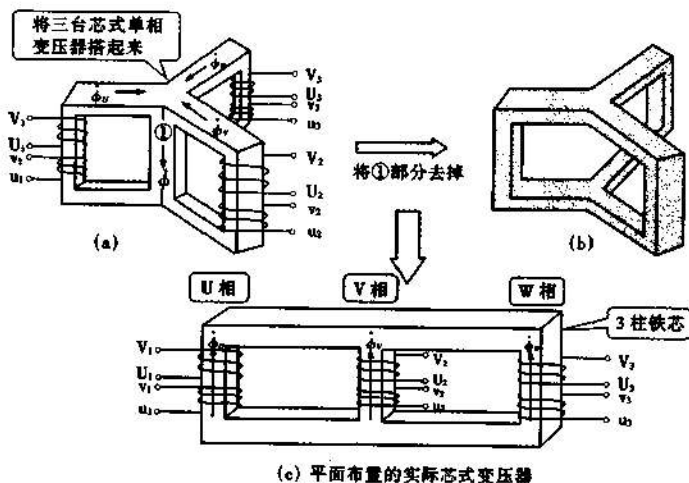


图 10.2 芯式三相变压器

10.1.1 结 构

用一台变压器进行三相电压电流变换的变压器称为三相变压器。在发、变电站等用大容量电力的地方使用(参看图 10.1)。

三相变压器的结构和单相变压器相同,有芯式和壳式两种。

(1) 芯式 把三台芯式单相变压器如图 10.2(a) 那样拼起

来, 在三个铁芯柱上绕上各相的一次绕组和二次绕组。给一次绕组施加三相对称电压, 各绕组间有 120° 的相位差, 产生 ϕ_u 、 ϕ_v 、 ϕ_w [Wb] 对称的三相磁通。这时, 铁芯中间芯柱①磁通为零。因此, 把中间芯柱去除也无关系。这就成为图(b)的样子。实际是如图(c)所示的平面铁芯结构。这称为三柱铁芯。

(2) 壳式 三相壳式是由三台单相壳式变压器排列起来的铁芯结构, 如图 10.3 所示。该图中央 V 相绕组的绕向应与其它两相绕向相反, 其理由是为了使铁芯①, ②, ③, ④, ⑤各磁路的磁通都相同。

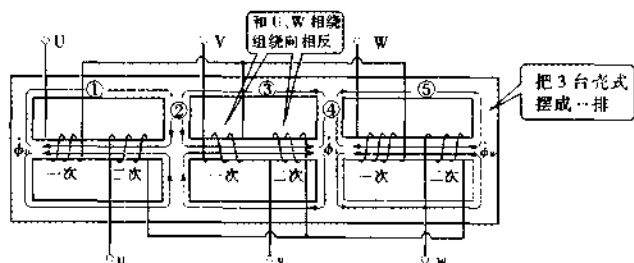


图 10.3 壳式接线方法

10.1.2 和三台单相变压器的比较

表 10.1

三相变压器的优点	三台单相变压器的优点
①铁芯量少, 重量减轻。	① Δ - Δ 连接的情况时一台故障后, 另两台用 V-V 连接, 故障变压器拆下修理;
②铁耗减少, 效率好且接线容易。	②备用设备费减少。
③套管和油量少, 价格便宜。	

10.2 自耦变压器和单相感应调压器

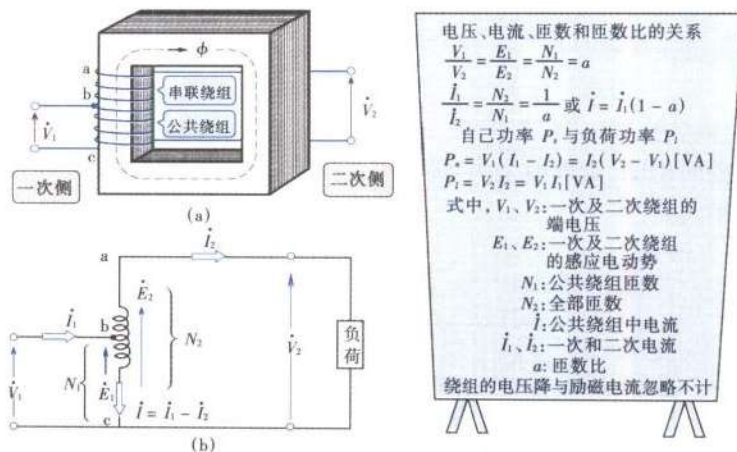


图 10.4 自耦变压器的结构和原理

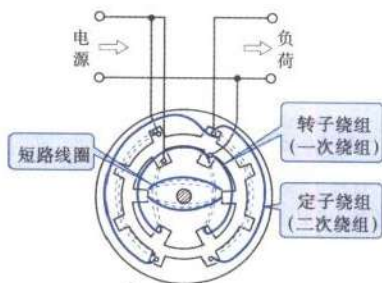
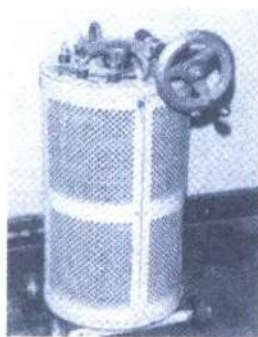


图 10.5 单相感应电压调整器及其结构

10.2.1 单绕组的自耦变压器

自耦变压器的结构是只有一个绕组, 从这个绕组的一部分引出一个出线端, 如图 10.4(a) 所示。该图中 b-c 间共有的绕组称为公共绕组, a-b 间的绕组称为串联绕组。

图(b)是自耦变压器的工作原理图,该图说明了电压、电流、匝数等等的关系。如果把公共绕组作为一次绕组,把串联绕组作为二次绕组,即自耦变压器就和普通变压器一样工作。变压器自身的功率称为自己功率 P_1 ,从二次端输出功率称为负荷功率 P_2 。这样,自耦变压器的额定容量可用自己功率和负荷功率表示。

自耦变压器用铜量少,故经济;另外因为一次、二次侧绕组是公共的,故漏磁少,电压调整率小,效率也高。但缺点是低压侧须用和高压侧相同的绝缘。自耦变压器多用于电力系统电压调整,还广泛作为滑动调节的自耦调压器,荧光灯升压变压器和交流电动机起动补偿器等。

10.2.2 单绕组变压器另一类型——单相感应调压器

图 10.5 示出了单相感应调压器的结构。在转子铁芯上绕有一次绕组,定子铁芯上绕有二次绕组。将一次绕组作为公共绕组,二次绕组作为串联绕组连接起来,依靠转动一次绕组可连续调整二次绕组感应电压的大小。

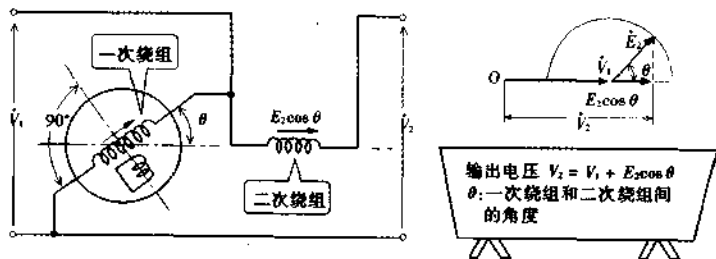


图 10.6 单相感应调整器的原理

10.3 测量用互感器



(a) 油浸式

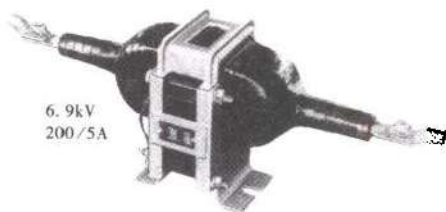


(b) 干式模制式

图 10.7 测量用电压互感器的外观



(a) 油浸式电流互感器



(b) 棒状干式电流互感器

图 10.8 电流互感器的外观

10.3.1 测量高电压、大电流用的互感器

在输配电系统的高电压、大电流电路中，很难用一般的仪表直接测量电压和电流。因此，需要变成可以测量的低电压和小电流。用于这一目的的测量专用的特殊变压器称为测量用互感器，有电压互感器和电流互感器。

10.3.2 电压互感器(potential transformer: PT)

电压互感器是将高电压变成低电压的变压器,与一般电力变压器没有不同;但为了测量误差小,绕组电阻和漏电抗相对要小。图 10.7 是其外观图。油浸式用于高压,干式用于低压。电压互感器的接线,如图 10.9 所示,一次侧接一般的电压指示表计。还应指出,电压互感器额定二次电压都统一为 110V*。

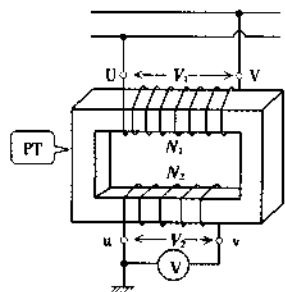


图 10.9 电压互感器的接线法

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad V_2 = KV_1$$

K : 变压比

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad I_2 = KI_1$$

K : 变流比

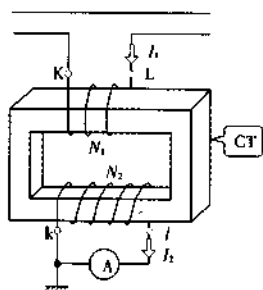


图 10.10 电流互感器的接线法

10.3.3 电流互感器(current transformer: CT)

电流互感器是将大电流变成小电流的变压器,为了使励磁电流小,铁损耗要小,故采用磁导率大的优质铁芯。图 10.8 是其外观图。油浸式用于高压,干式用于低压电路。电流互感器的接线,如图 10.10 所示,电流互感器的一次侧接测量电路,额定二次电流都统一为 5A。也应指出,一次侧若有电流时将二次侧开路,则绕组或仪表将烧坏。因此,电源切断后再使二次侧开路。

* 我国为 100V 或 $100\sqrt{3}$ 。——译者注

练习题

1. 试比较使用一台三相变压器和使用三台单相变压器进行三相交流变压的优缺点。

2. 有一台自耦变压器, 其一次和二次端电压为 200V 和 240V 时, 二次侧负荷电流为 30A。求该变压器的负荷功率 P_L 、自己功率 P_0 和公共绕组中的电流 I_c 。

3. 图 1 的自耦变压器中, 欲将单相交流电压 3000V 升至 3300V, 若一次侧电流供给 66A, 求变压器自己功率。计算中励磁电流和损耗忽略不计。

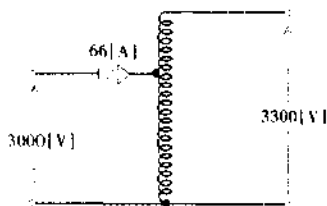


图 1

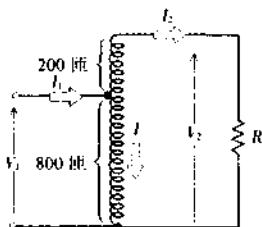


图 2

4. 有一台如习题图 2 中所示的自耦变压器。二次侧接有 100kW 的电阻负荷, $V_2 = 1000V$ 时, I_1 、 I_2 、 I 、 V_1 的值为多少?

5. 用两个电流互感器测量三相电路的线电流时, 接线如习题图 3 所示。若线电流 I_A 、 I_B 、 I_C 为 100A, 变流比为 10, 问电流表 A_1 、 A_2 、 A_3 的指示如何。

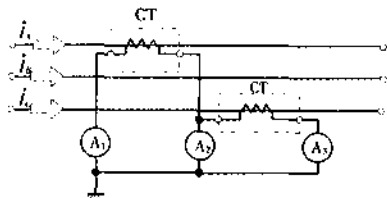


图 3

XI

整 流 器

发电和输配电供给的是交流电，但电气铁路和压延机等却用直流电动机驱动，生产铝和肥料也需要直流电。为此，需要有将输电线的交流电变换为直流电的电器，这种电器就是整流器。

常用的整流器中有硅和硒半导体整流器。硅整流器特别在收音机、电视机和计算机等电子设备的电源电路或信号电路中广为应用，电力方面也用得越来越多了起来。

本章学习半导体整流器、电力用晶闸管和整流电路等内容。

11.1 半导体整流器

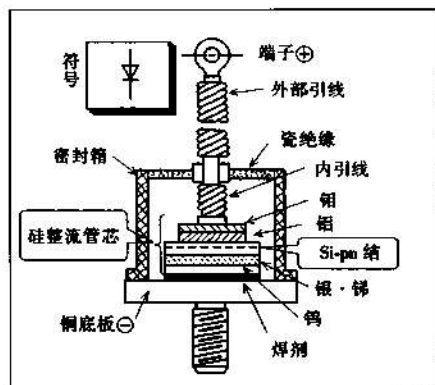
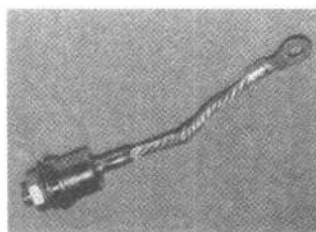


图 11.1 硅二极管

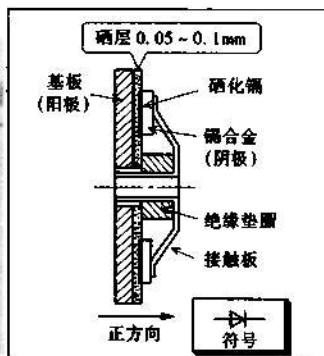
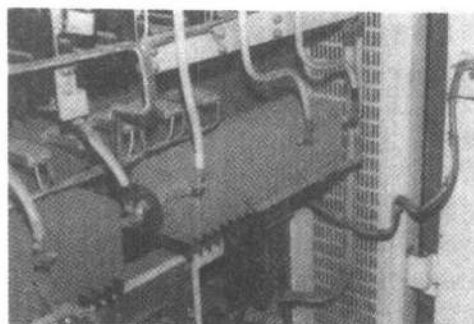


图 11.2 硒整流器

11.1.1 半导体整流器

这是利用 p 型半导体和 n 型半导体的 pn 结产生的整流作用而制作的整流器。代表性的有如图 11.1 所示的硅整流器(硅二极管)和如图 11.2 所示的硒整流器。

11.1.2 硅二极管

在高纯度的单结晶中渗入极少量的锗或锑等杂质，形成 p 型半导体和 n 型半导体两个部分，这两个部分结合为有整流作用的

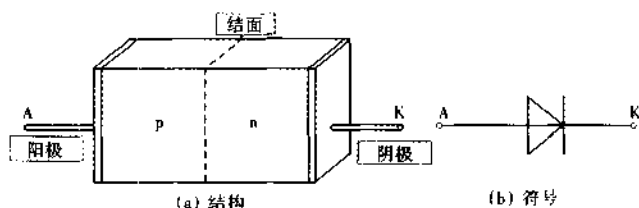


图 11.3 二极管的结构和符号

pn 结，故称这为硅 pn 结二极管，或简称为硅二极管。给两个部分装上电极，p 型部分的电极称为阳极，n 型部分称为阴极。图 11.3 是二极管的原理结构及其符号图。

(1) **pn 结施加正向电压时** p 型半导体 (p 是 positive 的第一个字母) 中带正电的空穴多，而 n 型半导体中带负电的电子多。这样，若按图 11.4 所示给 p 型部分施加正电压，而对 n 型部分施加负电压，则 p 型部分的正空穴将越过结面通过 n 型部分，被拉到负极 (-)。另一方面，n 型部分的电子将越过结面被拉到正极 (+)。正空穴和电子的移动形成电流。和电流方向一致的电压

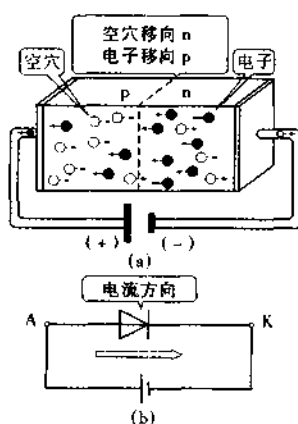


图 11.4 施加正向电压的情况

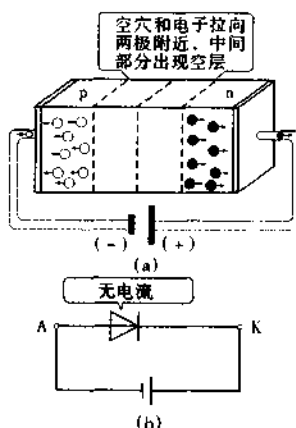


图 11.5 施加反向电压的情况

称为正向电压。

(2) **pn 结施加反向电压时** 如图 11.5 所示, 给 p 型部分施加负电压, n 型部分施加正电压时, p 型部分的正空穴只拉向负极, n 型部分的电子只拉向正极, 但并不越过结面, 不能形成电流。这时施加的电压称为反向电压。

(3) **硅整流器的特性** 已经知道: 二极管的电流是否导通, 取决于二极管电压的极性, 即有单向通电流的整流作用。图 11.6 给出了电力用硅二极管的电压 - 电流特性的一例。硅整流元件比硒整流元件电流大, 正向电流可至数千安。反向电压可至数万伏, 但易受温度影响。

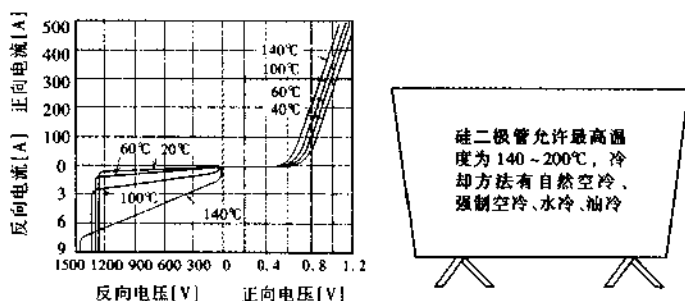


图 11.6 电力用硅二极管的电压 - 电流特性

大容量硅整流器装置是将多个硅二极管串、并联组装起来的。图 11.7 为硅二极管串并联的应用实例。

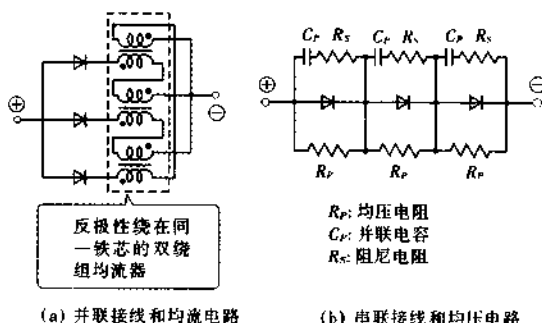


图 11.7 硅二极管的串并联接法

11.1.3 硒整流器

如图 11.2 所示, 硒整流元件是以硒为 p 型、硒化镉为 n 型形成的 pn 结。额定平均正向电流密度自冷式为 $50\text{mA}/\text{cm}^2$, 风冷式为 $0.2\text{A}/\text{cm}^2$, 比硅二极管低, 故尺寸大, 但其优点是热容量大, 因而过载能力强。元件的额定反向耐受电压有效值为 25V , 最高使用温度为 70°C 。图 11.8 为硒整流元件的电压 - 电流特性一例。根据电路中的电压和电流, 用适当个数的元件经串并联后组成硒堆来使用。

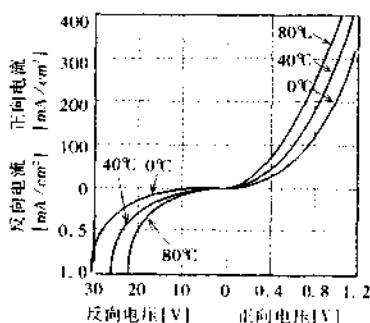


图 11.8 硒整流元件的特性

11.2

电力用晶闸管

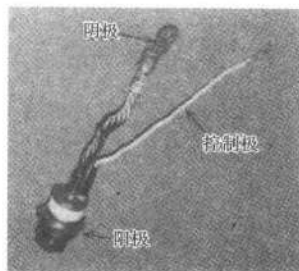
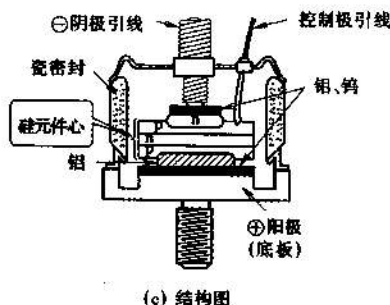
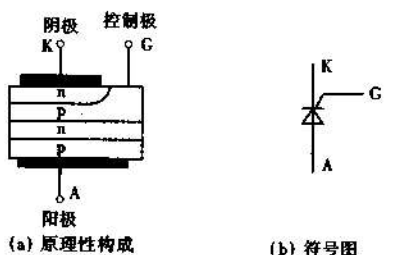


图 11.9 晶闸管

11.2.1 晶闸管

晶闸管是由 p 型半导体和 n 型半导体形成的四层三端硅半导体整流元件，也有四层三端以上的。代表性的晶闸管有三个电极：阳极(A)、阴极(K)和控制极(G)。晶闸管也称硅可控整流元件

(silicon-controlled-rectifier), 简记为 SCR。

图 11.9(a) 为晶闸管内部的原理结构, 图(b) 是符号图, 图(c) 是结构, 图(d) 是外观图。下面介绍电压 - 电流特性。

(1) 施加反向电压时 给 A 极施以负电压、K 极施以正电压时, 和硅二极管一样, 几乎无反向电流。

(2) 施加正向电压但无控制极电流 I_c 时 图 11.10(a) 给出了施加正向电压时的电压 - 电流特性。电压徐徐升高, 但电流几乎没有, 这时称为阻断状态。若再进一步升高电压, 则在某一电压

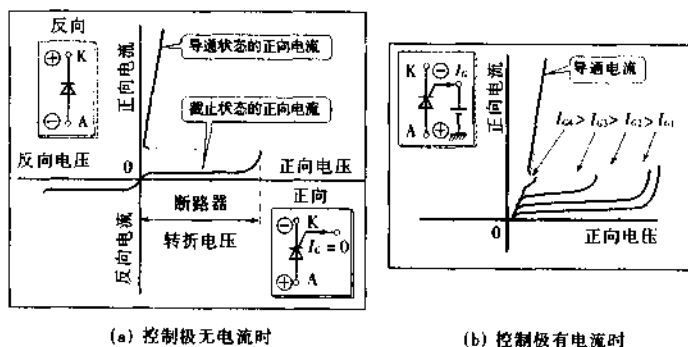


图 11.10 晶闸管的电压 - 电流特性

(转折电压) 时, 电流急剧增加。这时为导通状态。进入导通状态时 A、K 间电压急剧降至数 V 以内。晶闸管从阻断状态到导通状态的过渡称为击穿 (turn-on) 或点燃, 这时具有阻断和导通两个稳定状态。

(3) 施加正向电压且控制极有电流 I_c 时

图 (b) 示出了 A、K 间施

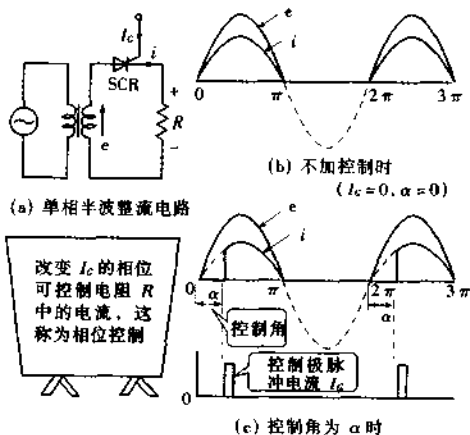


图 11.11 晶闸管的相位控制

加正向电压、G、K 间通有不大的电流 I_g 时的特性。随着 I_g 的加大,转折电压降低,或者说点燃电压降低。当 I_g 十分大时就和硅二极管正向特性一样了。

晶闸管一旦点燃,即使 I_g 变为零仍继续导通。因此, I_g 用脉冲电流即可。图 11.11 示出了用 I_g 控制晶闸管的情况。

11.2.2 晶闸管的应用

晶闸管的平均正向电流为 0.2 安至数千安,反向峰值耐受电压可至数万伏。因为能够用控制极电流控制输出电压或电流,所以不仅作为整流元件使用,还通过串并联用于下列装置:

(1) **顺变装置** 这是将交流电力变换为直流电力的装置,英文为 **converter**,直流输出电压连续可调,可作为可变电压电源、恒定电压电源、恒流源和旋转电机用直流电源等。

(2) **逆变装置** 这是将直流电力变换为交流电力的装置,英文为 **inverter**。逆变装置频率精度高,负荷变化时输出稳定,操作简单。可作为恒定频率电源、不间断电源和交流电动机电源。

(3) **变频装置** 这是顺变和逆变装置的组合。可将频率为 f_1 的电源变换为 f_2 的电源,或相反。直流输电用到这种方式。变换为比电源频率低的装置称为**频率顺变装置**,用于同步机和感应电动机的调速。

(4) **直流电动机调速装置** 在前面介绍过用电动发电机改变供给直流电动机枢电压以达到调速的方法,用硅变换装置可替代发电机,且效率高、响应快、体积小和重量轻。

11.2.3 SI 晶闸管

SI 晶闸管 (static induction thyristor 静电感应型晶闸管) 是在三层二极管中配置了带有细沟道的控制极,如图 11.12 所示。控制极无电压时处于导通状态;给其施加少许负电压时,即使电压很高也保持阻断状态。图 11.13 为这种晶闸管的截面图。

SI 晶闸管可快速合、切高电压大电流,损耗少,控制信号小也能工作。具有需要高频变换的大功率半导体的特性。图 11.14 示

出了它的应用范围。

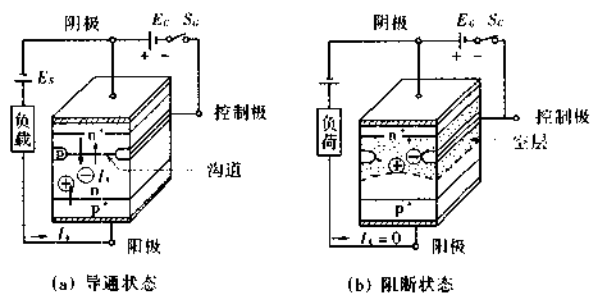


图 11.12 SI 晶闸管的结构和动作说明图

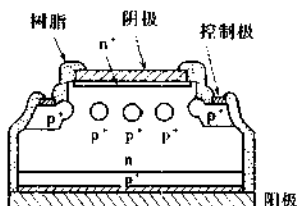


图 11.13 SI 晶闸管的截面图

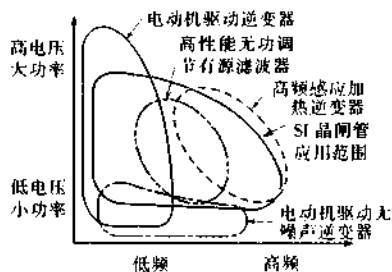
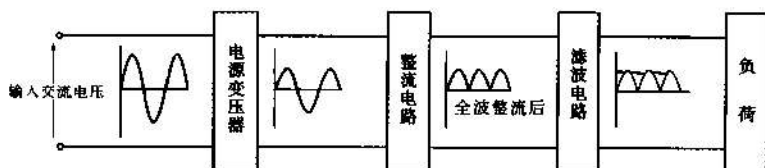
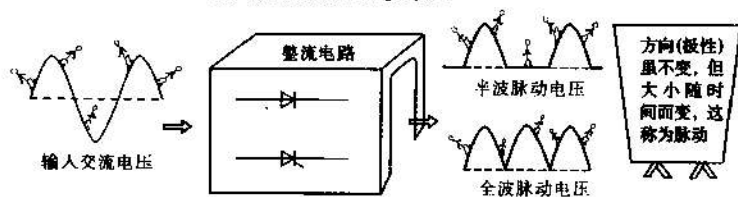


图 11.14 SI 晶闸管的应用范围

11.3 整流电路



(a) 简单的直流电源电路框图



(b) 整流电路输入输出波形

图 11.15 整流电路工作原理示意图

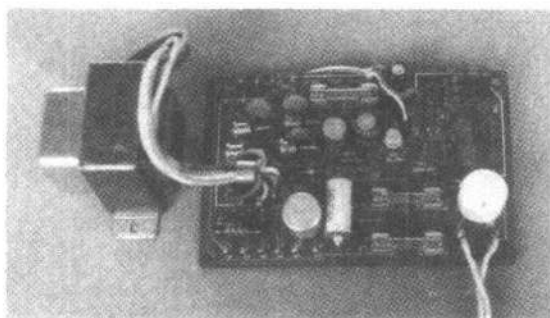


图 11.16 电视机直流电源电路例

11.3.1 整流电路

直流发电机和各种电池都可供给直流电力。但直流发电机装置太大,而电池功率小,换电池或充电麻烦且不经济。因此,需要大功率和长时间使用的直流时,就得应用从交流电源变换为直流的直流电源电路。

整流电路是直流电源电路的核心。利用硅二极管或晶闸管的整流作用,可从交流变换为脉动直流(参看图 11.15)。

另外,将脉动直流平整为接近完全直流的任务要靠滤波电路完成。

11.3.2 单相全波桥式整流电路

图 11.17 是用四个二极管接成的桥式电路。因在整个一周期内都能向负荷供给直流,故称单相全波桥式整流电路。利用半导体整流元件组成的单相整流电路中,这种单相全桥式整流电路用得最多。

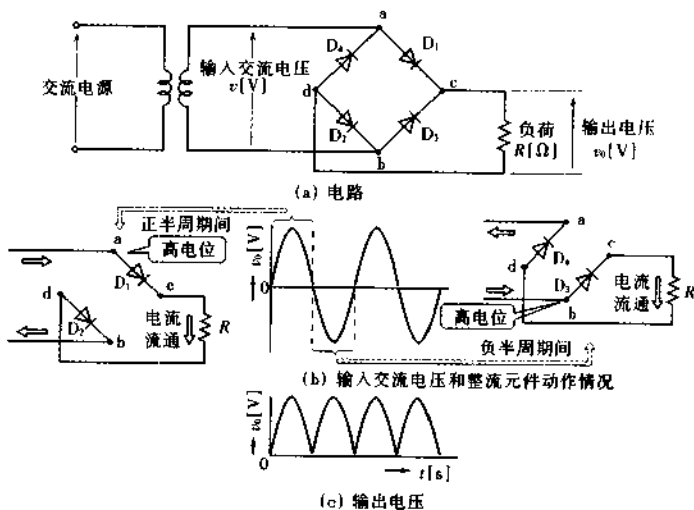


图 11.17 单相全波桥式整流电路工作原理和输出电压

图(b)中,在输入交流电压正半周期间,点 a 比点 b 电位高,沿 $D_1 \rightarrow R \rightarrow D_2$ 支路加有正向电压,从点 c 经 R 向点 d 流有电流。现在,当交流电压变为负半周,这时点 b 比点 a 电位高,沿 $D_3 \rightarrow R \rightarrow D_4$ 加有正向电压,电流还是从点 c 经 R 流向点 d。

这样,在交流电压的整个周期,从负荷 R 取出的电压是极性不变的直流输出电压。

11.3.3 三相半波整流电路

三相整流时,脉动小而输出电压高,故需要大功率输出场合,广泛采用三相整流电路。

图 11.18 示出了三相半波整流电路的工作原理和输出波形。对于变压器中心点的各相电压变化,如图 11.18(b)所示。

现在看 t_1 时刻,各相电压情况是 $e_1 > e_3 > e_2$, 只有 D_1 二极管加正向电压,因而只它导通。类似地,在 t_2 时刻,只有 D_2 导通。这样,在三相半波整流电路中,二极管 D_1, D_2, D_3 将按顺序导通,向负荷 R 供应直流电流。

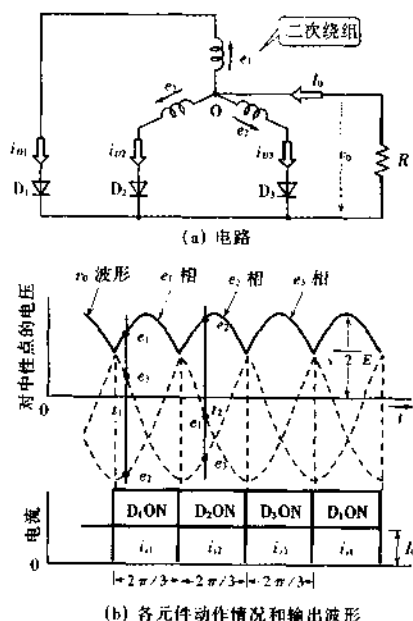


图 11.18 三相半波整流电路工作原理和输出波形

11.3.4 三相桥式整流电路

现在看由 6 个二极管接成的三相桥式整流电路的动作情况。二极管按 $D_1-D_2-D_4-D_5$, $D_2-D_3-D_5-D_6$, $D_3-D_1-D_6-D_4$ 组合,把三相电压 e_1, e_2, e_3 进行全波整流。通常,所接相电压最高的二极管导通。负

荷 R 端电压 v_0 的波形如图 11.19 所示。与单相全波整流电路和三相半波整流电路相比,这种整流电路的脉动小,输出电压高。

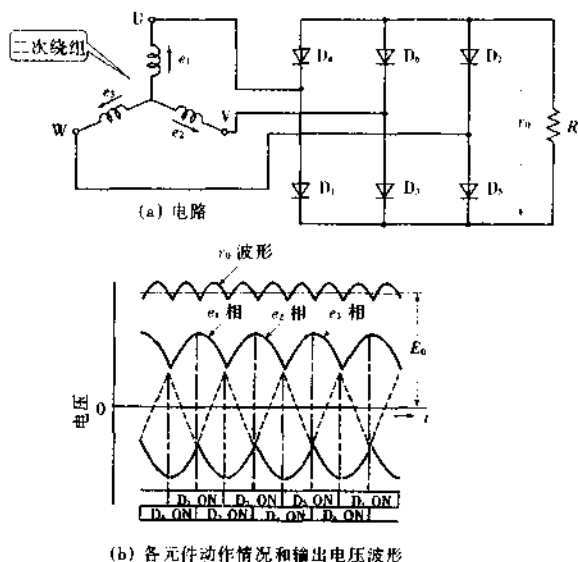


图 11.19 三相桥式整流电路工作原理和输出电压波形

练 习 题

1. 在下面空格中填入合适文字。

(a) 因为硅整流器的允许温度、允许电流密度和 ① 都 ② , 故适合作为 ③ 、大电流的整流装置, 在电化学和电气铁路等领域应用。另外, 因为硒整流器的 ④ 和反向耐压都 ⑤ , 故作为蓄电池的充电电源使用。

(b) 晶闸管的应用装置中有把交流变换为直流的 ⑥ 装置, 直流变交流的 ⑦ 装置, 把某一频率的交流变为另一频率的 ⑧ 装置, 还有直流电动机用的 ⑨ 装置。另外, 逆变装置英文叫 ⑩ 。

2. 习题图 1(a) 所示的电路中, 在①、②两端及③、④两端施加图(b)、图(c)所示的电压时, 请画出输出电压波形。

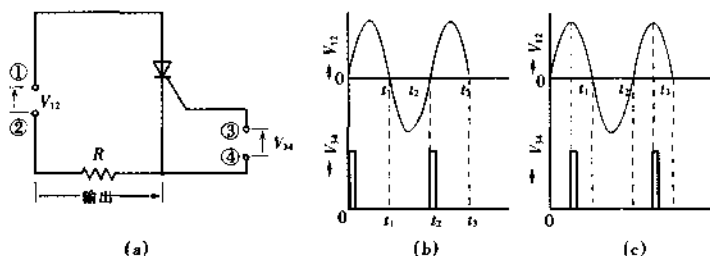


图 1

3. 习题图 2 为接有滤波电容的单相全波桥式整流电路。问三个图哪一个接的正确? 另外, 若 C 的电容量很大, 输入电压有效值为 100V 时直流输出电压为多大?

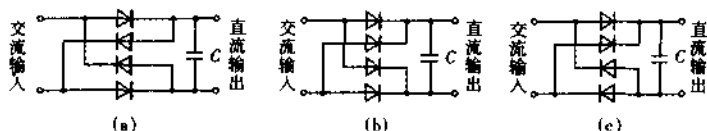


图 2

XII

开关电器和保护电器

电气设备技术标准规定：为了输配电线路和电气设备的运行、维护和检修，必要时应将线路断开或投入。举例来说，电力系统发生事故或故障时，该事故场所应快速被切断，故障设备应与带电的线路断开。这就需要有保护电力系统的装置。例如，日本的断路器最大切断能力为26200MVA，一个变电站有17台这种断路器。

本章学习开闭器、隔离开关和断路器等各种开关电器，还有确保电力系统安全的保护继电器等。

12.1 开关电器

表 12.1 各种高压开关电器的功能

电器种类	隔离能力	正常电流	异常电流		
		切合	通电	投入	切断
负荷开关	△	○	△	△	△
带熔断器的负荷开关	△	○	×	○	○
电磁开闭器	×	○	△	△	△
隔离开关	○	×	○	×	×
断路器	×	○	○	○	○

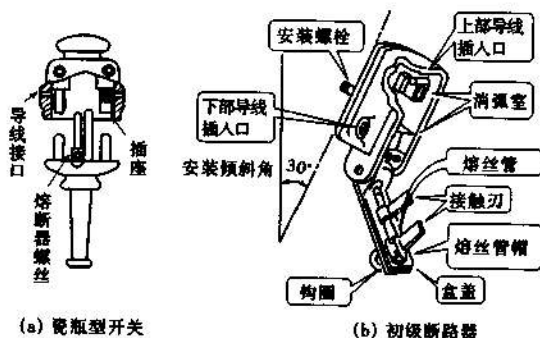
○: 可能 △: 根据情况可能 ×: 不可能



图 12.1 敞开型和带罩的闸刀开关



图 12.2 开关箱



(a) 瓷瓶型开关

(b) 初级断路器

图 12.3 瓷瓶型开关和初级断路器

12.1.1 关于开关电器

为了操作电路(投入或切断),必须使用适合本电路电压电流具体值的开关电器。特别当切断 100V 以上的高电压回路时,因电极间产生电弧,电弧使电极间完全导通,故回路难于切断。因此,根据使用目的和要求,开关电器正向不产生电弧和快速熄弧方面完善。开关电器包括开闭器、隔离开关和断路器等(参看表 12.1)。

12.1.2 开闭器

用于输配电线路的开闭器有以下几种:

(1) **闸刀开关** 常装于配电盘上,有敞开型和带罩的两种。敞开型的额定电压为 250V,额定电流为 30~600A;带罩的为 250V, 15~100A;各有 2 极和 3 极的(参看图 12.1)。

(2) **开关箱** 把闸刀开关装于金属箱内,还带有电流表和指示灯。常作为电动机附带的开闭器使用,额定电流 200A、额定容量 15kW 以下。

(3) **瓷瓶型开关和初级断路器** 用于配电变压器一次侧投切以及过电流保护。熔断器装于内部,熔断能力上限为 1500~3000A(参看图 12.3)。

(4) **带熔断器的负荷开关** 由高压熔断器和空气负荷开关

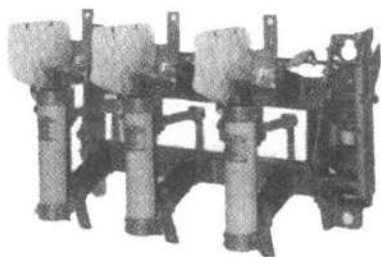


图 12.4 带熔断器的空气负荷开关



图 12.5 充气负荷开关

组装成一体化的开闭器，熔断器切断短路电流，负荷开关投切负荷电流。用作 6.6kV 高压受电变电所的主断路器。

(5) 充气负荷开关 把绝缘性能是空气的 2~3 倍、灭弧性能为 100 倍的六氟化硫 (SF_6) 气体封入容器内，切断能力达 7.2kV、200A。用于负荷的频繁投切操作、电容器组的自动控制以及夜间轻负荷时变压器的操作(参看图 12.5)。

此外，作为高压开闭器还广泛应用柱上油开关。油开关罐中充满绝缘油，触头在油中动作。还有在真空室中动作的真空开关以及磁吹开关。

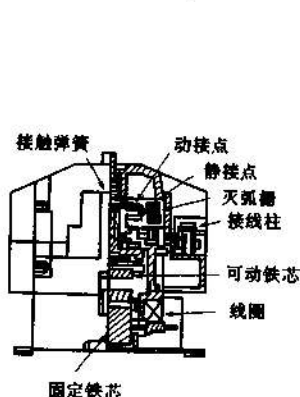


图 12.6 电磁开闭器结构

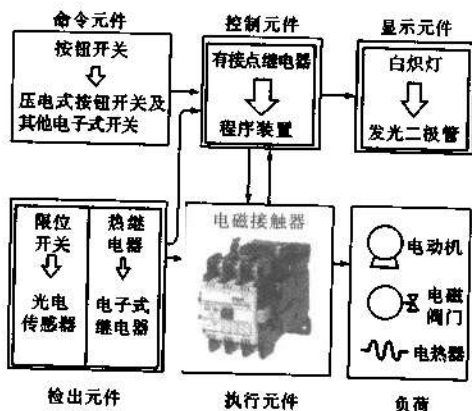


图 12.7 向电子化发展的电磁开闭器

(6) 电磁开闭器 接点用电磁铁操作的电磁接触器和过电流保护的热继电器装在一个外壳内，用于电动机、加热器、照明、电磁阀门以及电源等等的投切操作(参看图 12.6)。

图 12.7 示出了正向电子化发展的电磁开闭器的框图。

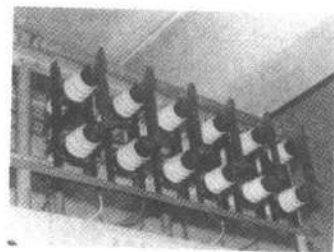


图 12.8 隔离开关具体施工例

12.1.3 隔离开关

隔离开关 (disconnecting switches: DS) 用于回路无电流的空载状态时的投切操作，回路有

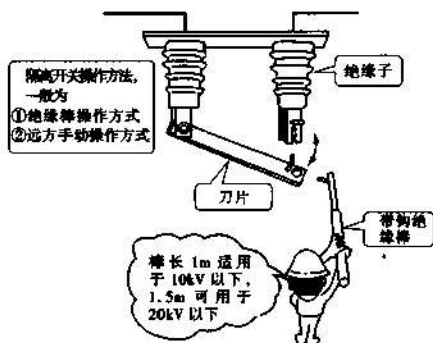


图 12.9 带钩绝缘棒的操作方法

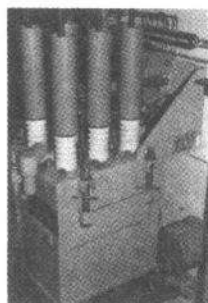


图 12.10 少油式油断路器

负荷电流时不能操作。回路有电流时，须用油开关或其他断路器将负荷切开，之后隔离开关才能操作。图 12.8 为隔离开关具体施工例。这在配电室等地方维修设备或切换电路时常用。有 22 ~ 154kV 的水平两点切隔离开关和 220 ~ 275kV 的水平一点切隔离开关。图 12.9 为操作方法示例。

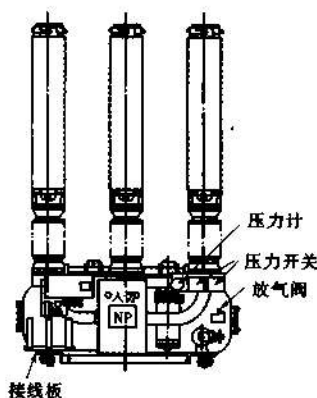


图 12.11 空气断路器

12.1.4 断路器

断路器可投切正常状态的电路；接地或短路事故时，断路器根据过电流继电器检出的事故信号，自动快速地切断电路。表 12.2 列出了高压断路器的种类（参看图 12.10 和图 12.11）。

表 12.2 高压断路器的种类(3.6kV 等级)

油断路器	小容量的靠绝缘油自流横吹消弧，大容量的有利用压力效果的灭弧室
磁吹断路器	利用被切电流产生的磁场把弧拉入灭弧室，电弧被拉长的同时得到冷却，从而灭弧
真空断路器	利用高真空绝缘强度高的特性，在真空中进行投切操作并能灭弧
空气断路器	利用压缩空气吹弧，主要是用绝缘好的空气置换已被电高的空气
SF ₆ 断路器	六氟化硫(SF ₆)气体绝缘强度高灭弧性能好

12.2 保护电器

表 12.3 按结构分类

感应圆盘型	旋转磁场或移动磁场中放置圆盘,由于感应作用而产生转矩。保护继电器一般多用感应圆盘型的(参看图 12.12)
感应环型	铁芯气隙磁场中放置短路环,短路环感应电流和气隙磁场相互作用使圆环快速动作
感应圆筒型	移动磁场中放置圆筒杯,由于感应作用而产生转矩。适合用于快速继电器
可动线圈型	可动线圈的指针上带有触点,因有指针,故也称表式继电器
可动铁芯型	作用于铁芯的电磁吸引力或反作用力使可动铁芯动作。此为直流继电器,信号微小变化即引起动作
整流型	直流继电器和整流器组合起来用于交流
电动机型	由电动机驱动的继电器,有直流和交流两种。例如用小型同步电动机和减速齿轮组起来作为时间继电器用
热动型	靠热效应动作
固态型	无可动部分,是用半导体元件制成的晶体管继电器

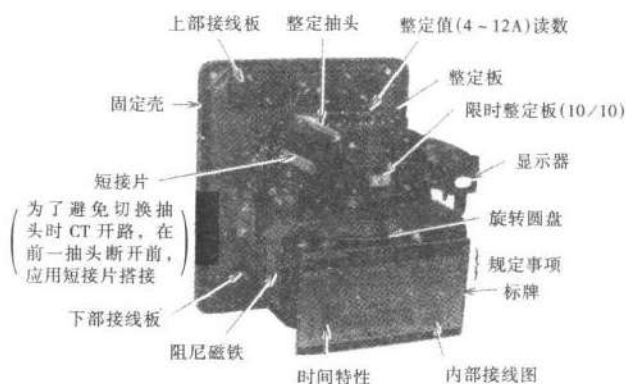


图 12.12 感应圆盘型过流继电器的内部结构

12.2.1 关于保护电器

输配电线路和电气设备发生事故或故障时,应尽快且确实地

将事故区间切断或将故障设备从线路切开会,使线路和相关设备得到保护,事故波及面降至最小。为此,就要检测出事故或故障的位置、形态和程度,给断路器发出跳闸命令。完成这些功能的设备称为保护电器,其中有保护继电器。

12.2.2 保护继电器的分类

表 12.4 按功能分类

电流继电器	电流达到整定值时动作,有过流继电器和欠流继电器
电压继电器	电压达到整定值时动作,有过压继电器和欠压继电器
功率继电器	功率达到整定值时动作,有过功率继电器和欠功率继电器
差动继电器	根据电压、电流或其他量两值之差动作
方向继电器	根据功率、电压和电流的方向动作
距离继电器	根据继电器设置点和故障点的距离,确定其动作特性
接地继电器	接地故障时动作
频率保护继电器	频率到达整定值时动作,有高于某频率动作的继电器,也有低于某频率动作的

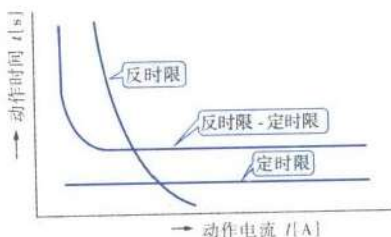


图 12.13 继电器的动作时限

表 12.5 动作时限的分类

反时限	动作电流大时,动作时间小,即时间与电流值成反比(参看图 12.13)
定时限	动作电流增大时,动作时间保持不变
反时限-定时限	动作电流在一定范围内呈反时限特性,在此范围外呈定时限特性
瞬时-快速	动作无延时作用,在 3~0.5Hz 内动作的特称为快速继电器

12.2.3 感应圆盘型过流继电器

这是保护继电器中有代表性的一种,现在已广泛使用。

(1) 原理 如图 12.14 所示,有两束平行的正弦变化的磁通 ϕ_1 、 ϕ_2 ;若频率相同,相位不同,则相位超前的磁通相继向相位滞后的磁通移动,由此产生移动磁场。假如在此移动磁场中放入一个金属圆盘,则在圆盘中产生涡流,涡流和磁场间的电磁力将产生沿磁场移动方向的驱动转矩 T ,它使圆盘旋转。

(2) 动作 图 12.15 中主电路发生事故,经互感器流入继电器的过电流超过整定值时,由电流产生的移动磁场使圆盘旋转。圆盘上带有可动接点,可动接点将与固定接点接触。此时直流电源经发条、可动接点和固定接点接通,断路器的跳闸线圈有直流电流流通,从而使断路器动作,主回路断开。电流降到整定值以下时,圆盘靠发条的力复位。

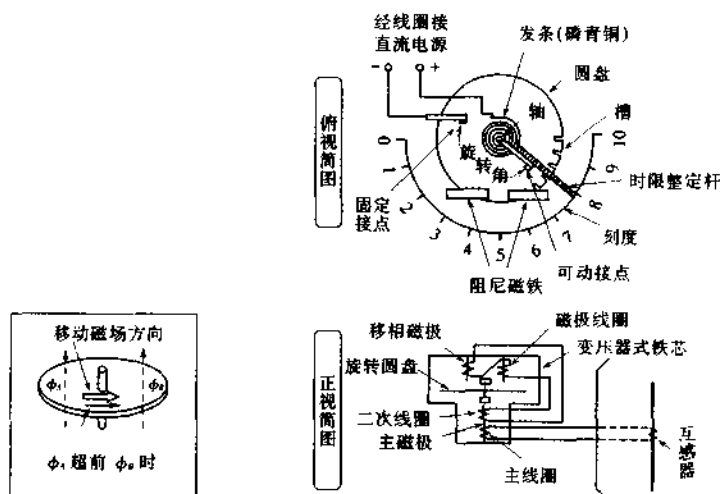


图 12.14 感应圆盘型继电器的原理

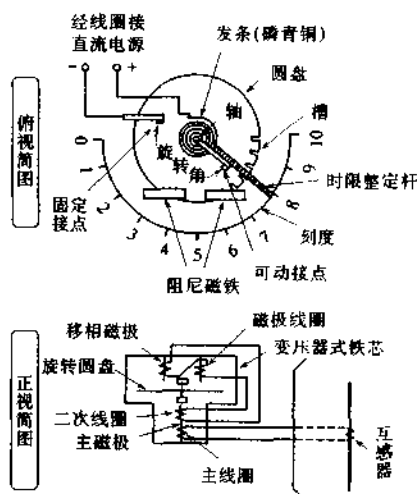


图 12.15 感应圆盘型过流继电器的结构和动作情况

另外,从故障电流发生到继电器接点闭合为止的时间称为时限。移动圆盘上的时限整定杆,可改变可动接点和固定接点间的旋转角度,即可改变时限。

12.2.4 固态型过流继电器

固态型过流继电器是用晶体管、集成电路和微机等等组成的继电器,它以固态型无接点电路取代了有机械接点的电路。

与感应圆盘型相比,有以下优点:

(1) **容易进行动作协调** 动作时间与电流值平分成反比例,即有超反时限特性,惯性特性也比有机械接点的继电器好,这就容易进行和配电断路器或低压断路器之间的动作协调。

(2) **抗震性好** 对于地震和振动的抗震性提高了5倍以上。

(3) **能实现小型化、复合化和一体化** 由于是无接点的固态型过流继电器,可作成小型的,故在一个外壳里可装适合三相电路的三相式过流继电器,或把三相式过流继电器和接地继电器装于一个外壳,成为一体化的复合型继电器,还有的把低压断路器、互感器和过流继电器形成一体化,再配上一些监视功能(参看图12.16)。



图 12.16 过流继电器、互感器和断路器组成的一体化装置例

练 习 题

1. 简单说明初级断路器的结构和用途。
2. 说明充气负荷开关和电磁开闭器的特点,它们用于何种场合?
3. 请在下面空格中填入合适文字。

(a) 因隔离开关没有___①___功能,切断线路时,应先断开___②___,再操作隔离开关。

(b) 因空气断路器的投切动作是在___③___进行,故熄弧不用___④___,而用___⑤___将弧吹灭。另外,油断路器用于切断___⑥___,有多油式(罐型)和___⑦___两类。

4. 保护继电器按动作时间分类有哪些类?
5. 试比较说明固态型过流继电器和感应型过流继电器的特点。
6. 时限整定杆有何用?

7. 低压室内干线接有额定电流分别为45A、23A、15A、10A的四台电动机,过电流断路器的额定电流最大值为下面四个数字的哪一个合适?已知干线的允许电流为125A,负荷同时需要率为100%。另外,根据日本电气技术标准185条,干线接有电动机等场合,过电流断路器的额定电流应取为电动机额定电流的3倍以下,当干线允许电流超过100A时,可以取最接近的高一档的值。

(a) 100A (b) 150A (c) 200A (d) 300A

练习题答案

I 直流发电机

1. 根据右手定则, 向右转。
2. (a) $I_a = 120 / (0.2 + 5.8) = 20 \text{ [A]}$
(b) $V = 120 - 20 \times 0.2 = 116 \text{ [V]}$
(c) $P = 20^2 \times 5.8 = 2320 \text{ [W]}$
3. 波绕时 (a) 2 (b) 2 (c) $36 \times 12 \times 2 = 864$
(d) $864 \div 2 = 432$ (e) 25 [A] (f) 259.2 [V]
叠绕时 (a) 4 (b) 4 (c) 864
(d) $864 \div 4 = 216$ (e) 12.5 [A] (f) $216 \times 0.6 = 129.6 \text{ [V]}$
4. (a) $I_a = 6000 / 200 = 30 \text{ [A]}$
(b) $I_f = 200 / 40 = 5 \text{ [A]}$
(c) $I_a = 30 + 5 = 35 \text{ [A]}$
(d) $E = 200 + 35 \times 0.2 = 207 \text{ [V]}$
5. $P_i = 12 / 0.85 = 14.1 \text{ [kW]}$
 $P_r = 14.1 - 12 = 2.1 \text{ [kW]}$
6. 电压调整率 $= [(105 - 100) / 100] \times 100 = 5 \text{ [%]}$

II 直流电动机

1. $E = \frac{Z}{a} \times \frac{P}{60} \times \Phi n = \frac{720}{4} \times \frac{4}{60} \times 0.01 \times 1200 = 144 \text{ [V]}$
2. $E = 220 - 50 \times 0.05 = 217.5 \text{ [V]}$
3. $\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2 \times 3.14 \times \frac{1500}{60} = 157 \text{ [rad/s]}$
 $T = P / \omega = 15 \times 10^3 / 157 = 95.5 \text{ [N} \cdot \text{m]}$
4. $T = 60(215 \times 50 - 50^2 \times 0.1) / (2\pi \times 1500) = 67 \text{ [N} \cdot \text{m]}$
5. $n = \frac{V - I_a(R_a + R_f)}{\Phi} \quad \Phi = 1/3$
 $n = 3(400 - 50 \times 0.5) = 1125 \text{ [r/min]}$
6. (a) $I_a = \frac{100}{0.2} = 500 \text{ [A]}$
(b) $R' = 100 / 50 = 2 \quad R = 2 - 0.2 = 1.8 \text{ [\Omega]}$

III 三相感应电动机

$$1. \quad n_s = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ [r/min]}$$

$$n = (1 - 0.05) \times 1200 = 1140 \text{ [r/min]}$$

$$2. \quad P_i = \frac{15 \times 10^3}{0.85} = 17.65 \times 10^3 \text{ [W]}$$

$$I = \frac{17.65 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 200 \times 0.8} = 63.8 \text{ [A]}$$

$$3. \quad n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ [r/min]}$$

$$s = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0.05$$

$$T = \frac{30 \times 10^3}{9.8 \times 2\pi \times \frac{1425}{60}} = 20.52 \text{ [kg} \cdot \text{m]}, \quad 201 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$P_2 = 9.8 \times 2\pi \times \frac{1500}{60} \times 20.52 = 31\,572 \text{ [W]} = 31.6 \text{ [kW]}$$

$$sP_2 = 0.05 \times 31.6 = 1.58 \text{ [kW]}$$

$$4. \quad \left(\frac{1}{0.2} \times 0.01\right) - 0.01 = 0.04 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$5. \quad (0.65)^2 = 0.4242 \text{ [%]}$$

$$6. \quad f_1 = \frac{800 \times 4}{120} = 26.7 \quad f_2 = \frac{2000 \times 4}{120} = 66.7$$

从 26.7 [Hz] 到 66.7 [Hz]。

IV 各种感应电动机

- (e) 中心部分的漏电抗增加。
- (e) 功率因数为 90% 左右。

V 同步发电机

$$1. \quad n = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ [r/min]}$$

$$2. \quad E = \sqrt{3} \times 4.44 \times 50 \times 108 \times 0.21 = 8\,721 \text{ [V]}$$

$$3. \quad (a) \quad I_a = \frac{10000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6600} = 874.8 \text{ [A]}$$

$$I_L = 1.25 \times 874.8 = 1\,093.5 \text{ [A]}$$

$$(b) Z_s = \frac{V_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{6600}{\sqrt{3} \times 1093.5} = 3.5 [\Omega]$$

$$4. (a) I_b = \frac{5000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6600} = 437.4 [\text{A}]$$

(b) 短路电流等于额定电流时的励磁电流

$$I_f = 200 \times \frac{437.4}{600} = 145.8 [\text{A}]$$

$$\text{短路比 } K = 200 / 145.8 = 1.37$$

$$(c) x_s = \frac{6600\sqrt{3}}{600} = 19.1 [\Omega]$$

$$5. P_0 = \sqrt{3} \times 6600 \times 70 \times 0.8 \div 0.92 = 695.8 \times 10^3 [\text{W}] = 695.8 [\text{kW}]$$

VI 同步电动机

1. (e) 和同步发电机相反, 电枢反应表现为滞后电流有增磁作用。

$$2. p = \frac{120 \times 60}{600} = 12$$

$$3. T = \frac{60 \times \sqrt{3} \times 200 \times 40 \times 0.96 \times 0.87}{2\pi \times 1500} = 73.7 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$4. 73.7 \div 9.8 = 7.52 [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

$$(a) V' = \sqrt{\left(\frac{200}{\sqrt{3}}\right)^2 + (12 \times 7)^2} = 142.8 [\text{V}]$$

$$(b) \delta = \sin^{-1} \frac{12 \times 7}{142.8} = 36^\circ$$

$$(c) 3P = \frac{3 \times \frac{200}{\sqrt{3}} \times 142.8 \times \sin 36^\circ}{7} = 4.16 [\text{kW}]$$

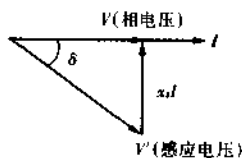


图 1

VII 交流整流子电动机

1. (d)

2. (c)

VIII 小型电动机

1. (e)

IX 变压器

$$1. (a) a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{3150}{105} = 30$$

$$V_2 = \frac{V_1}{a} = \frac{3300}{30} = 110 [\text{V}]$$

$$(b) V_1 = aV_2 = 30 \times 100 = 3000 [\text{V}] = 3 [\text{kV}]$$

$$(c) N_1 = aN_2 = 30 \times 80 = 2400 [\text{匝}]$$

$$2. (a) V_2 = \frac{V_1}{a} = \frac{6600}{30} = 220 [\text{V}]$$

$$(b) P = VI \cos \theta$$

$$\therefore I_2 = \frac{P_2}{V_2 \cos \theta} = \frac{50\,000}{220 \times 0.8} = 284 [\text{A}]$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{284}{30} = 9.47 [\text{A}]$$

$$(c) P_1 = V_1 I_1 = 6600 \times 9.47 = 62500 = 62.5 [\text{kVA}]$$

$$3. \text{磁通最大值 } \phi_m = 0.8 \times 5 \times 10^{-3} = 4 \times 10^{-3} [\text{Wb}]$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \phi_m = 4.44 \times 60 \times 3000 \times 4 \times 10^{-3} \approx 3197 [\text{V}]$$

因二次绕组匝数是一次的 $1/20$, 故

$$E_2 = \frac{3197}{20} \approx 160 [\text{V}]$$

$$4. I_{0w} = \frac{990}{V_1} = \frac{990}{3300} = 0.3 [\text{A}]$$

$$I_{0i} = \sqrt{0.5^2 - 0.3^2} = 0.4 [\text{A}]$$

$$5. a = \frac{3000}{100} = 30$$

因为 $P_2 = \sqrt{3} V_w I_w$

$$I_w = \frac{P_2}{\sqrt{3} V_w} = \frac{15 \times 1000}{\sqrt{3} \times 100} = 86.6 [\text{A}] \quad I_w' = \frac{I_w}{\sqrt{3}} = \frac{86.6}{\sqrt{3}} = 50 [\text{A}]$$

$$I_v = \frac{I_w}{a} = \frac{86.6}{30} = 2.89 [\text{A}] \quad I_v' = \frac{I_v}{\sqrt{3}} = \frac{2.89}{\sqrt{3}} = 1.67 [\text{A}]$$

$$6. 40 [\text{kVA}] \times \sqrt{3} = 69.3 [\text{kVA}]$$

$$7. I_2 = aI_1 = 85 \times 6 = 510 [\text{A}]$$

$$8. a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2000}{200} = 10$$

$$\therefore \text{归算到一次侧, } r_{21} = r_1 + a^2 r_2 = 18 [\Omega], \quad x_{21} = x_1 + a^2 x_2 = 14 [\Omega]$$

$$\text{归算到二次侧, } r_{12} = r_1 / a^2 + r_2 = 0.18 [\Omega], \quad x_{12} = x_1 / a^2 + x_2 = 0.14 [\Omega]$$

$$9. \quad \eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输出功率} + \text{损耗}} \times 100 = \frac{150}{150 + 0.8 + 0.7 + 0.3} \times 100 = 98.8[\%]$$

$$10. \quad \eta = \frac{W \cos \theta}{W \cos \theta + p_i + p_c} \times 100 = \frac{30 \times 0.8}{30 \times 0.8 + 0.2 + 0.4} \times 100 = 97.6[\%]$$

X 各种变压器

1. 参看表 10.1。

$$2. \quad P_1 = V_2 I_2 = 240 \times 30 = 7200 = 7.2[\text{kVA}]$$

$$P_i = I_2(V_2 - V_1) = 30(240 - 200) = 1200 = 1.2[\text{kVA}] \quad P_1 = V_1 I_1$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} = \frac{7200}{200} = 36[\text{A}] \quad \therefore I = I_1 - I_2 = 36 - 30 = 6[\text{A}]$$

$$3. \quad a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{3000}{3300} = \frac{30}{33} \quad I_2 = a I_1 = \frac{30}{33} \times 66 = 60[\text{A}]$$

$$P_1 = V_1(I_1 - I_2) = 3000(66 - 60) = 18000 = 18[\text{kVA}]$$

$$4. \quad P_1 = V_2 I_2 \quad I_2 = \frac{P_1}{V_2} = \frac{100 \times 1000}{1000} = 100[\text{A}]$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{800}{1000} = \frac{8}{10}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{100}{\frac{8}{10}} = 100 \times \frac{10}{8} = 125[\text{A}]$$

$$I = I_1 - I_2 = 125 - 100 = 25[\text{A}]$$

$$V_1 = a V_2 = \frac{8}{10} \times 1000 = 800[\text{V}]$$

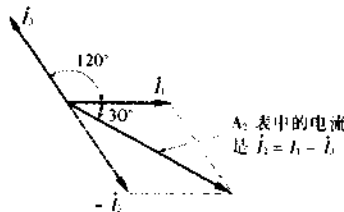


图 2

5. 电流表 A_1 和 A_3 读数为各干线电流

100[A] 经电流互感器之后的值, 即

$100/10 = 10[\text{A}]$ 。但 A_2 的读数为 A_1 中电流 I_1 和 A_3 中电流 I_3 之差,

即 $10\sqrt{3}$ 。

答: $A_1 = 10[\text{A}]$, $A_2 = 17.3[\text{A}]$, $A_3 = 10[\text{A}]$ 。

XI 整流器

1. (a) ①反向耐压 ②高 ③高电压 ④电流 ⑤小

(b) ⑥正变换 ⑦反变换 ⑧频率变换 ⑨直流电动机调速

⑩ inverter

2.

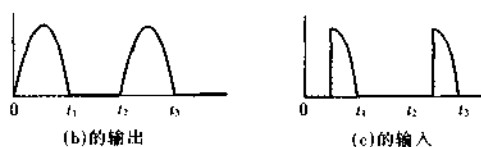


图 3

3. 正半波和负半波都使电容器 C 充电到电压最大值。

$$\text{即 } E_m = \sqrt{2} E$$

$$E_m = \sqrt{2} \times 100 = 141 [\text{V}] \quad (\text{c})$$

XII 开关电器和保护电器

1. 参看 12.1.2 中(c)。

2. 参看 12.1.2 中(e)、(f)。

3. (a) ①灭弧 ②断路器

(b) ③大气中 ④绝缘油 ⑤压缩空气 ⑥高压大电流 ⑦少油式

4. 参看表 12.5。

5. 参看 12.2.4。

6. 参看 12.2.3 小节中 (2)。

7. $(45 + 23 + 15 + 10) \times 3 = 279 [\text{A}]$ ∴ 根据提到的技术标准 185 条, 取 $300 [\text{A}]$ 。